

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองการทำงานของระบบ WiMAX ด้วยโปรแกรม MATLAB

Simulation of WiMAX System with MATLAB



โดย

นายผดิมพงศ์ ดีพร้อม

นายภาณุวัฒน์ นิลยาภรณ์

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 72665

วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ย. 2550

b. 11221069
i.

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION OF WiMAX SYSTEM WITH MATLAB



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHLOR IN DEPARTMENT OF ININFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การจำลองการทำงานของระบบ WIMAX ด้วยโปรแกรม MATLAB
ชื่อนักศึกษา นายเผด็จพงศ์ ดีพร้อม รหัสนักศึกษา 47015571
นายภาณุพัฒน์ นิสยาภรณ์ รหัสนักศึกษา 47015577
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.มนต์ชัย แซ่ม้อย
ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา 2549

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้รับ
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

(ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล)

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(ผศ.มนต์ชัย แซ่ม้อย)

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การจำลองการทำงานของระบบ WiMAX ด้วยโปรแกรม MATLAB	
ชื่อนักศึกษา	นายเผด็จพงศ์ ดีพร้อม	รหัสนักศึกษา 47015571
	นายภาณุวัฒน์ นิลยาภรณ์	รหัสนักศึกษา 47015577
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.มนต์ชัย แจ่มช้อย	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ	
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
ปีการศึกษา	2549	

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เทคโนโลยีไร้สายใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงที่ได้นำมาทำ คือ เทคโนโลยีที่สามารถทำงานระหว่างเครือข่ายทั่วโลกสำหรับการเข้าถึงไมโครเวฟ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WiMAX) ที่มีความสามารถส่งสัญญาณได้ไกล และอัตราการส่งข้อมูลสูง ดังนั้น โครงการนี้ได้ศึกษาการทำงานของระบบ WiMAX ซึ่งการจำลองแบบการทำงานของ WiMAX โดยใช้โปรแกรม MATLAB ได้วิเคราะห์หาประสิทธิภาพการส่งผ่าน และอัตราความผิดพลาดบิตในช่องสัญญาณแบบต่างๆ

Thesis Title Simulation of WiMAX System with MATLAB Program
Student Mr. Padermpong Deeporm ID. 47015571
Mr. Panupat Ninyaphorn ID. 47015577
Advisor Asst. Prof. Pichaya Supannakoon
Asst. Prof. Monchai Chamchoy
Graduate Level Bachelor Degree of Information Engineering
Department Information Engineering
Academic Year 2006

ABSTRACT

Nowadays, wireless communication technologies are very important. The new wireless Communication technology with high performance is worldwide interoperability for microwave access (WiMAX), which can transmit the signal along the far distance and high data rate.

Therefore, this thesis studies the performance simulation of WiMAX system. The operation of WiMAX system is modeled by using MATLAB program. Moreover, the transmission performance and the bit error rate in the various types of the channels are investigated.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล ผศ.มนต์ชัย แซ่ม้อย ที่คอยให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ทั้งด้านการออกแบบ แนวคิด และแนวทางในการทำงานโครงการ

ขอขอบคุณ บิดามารดาและเพื่อนทุกคนที่คอยให้กำลังใจในการทำโครงการนี้ และให้การสนับสนุนเสมอมา

ขอขอบคุณพี่น้อง พี่เอก พี่เอ็น พี่จ๋อน พี่สี่ พี่วอ พี่ยา พี่คิง และพี่ๆทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณ สาลี่ที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือในการทำงาน และให้ปัจจัยด้านการเงินเป็นครั้งเป็นคราว ขอขอบคุณจริงๆครับ

ขอขอบคุณน้ำหอม ลำเนา ศักดิ์ศรี ที่ให้ข้าพเจ้าใช้อินเทอร์เน็ตในการค้นหาข้อมูลต่างๆ
สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ โลกที่กำลังพัฒนาไปเรื่อยๆ และกำลังจะตายในที่สุด



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์	1
1.3 ขอบเขตและลักษณะของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ของงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีในการใช้งาน WIMAX	3
2.1 รูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่าย (Network Topology)	4
2.1.1 Point to Point (PTP)	4
2.1.2 Point to Multipoint (PTM)	4
2.1.3 Mesh Topology	4
2.2 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Model)	4
2.2.1 การติดต่อสื่อสารที่อยู่ในแนวระดับสายตา	4
2.2.2 การติดต่อสื่อสารที่ไม่อยู่ในแนวระดับสายตา	4
2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)	6
2.4 หลักการและโครงสร้างของ OFDM	8
2.5 การเข้ารหัสสัญญาณ	12
2.5.1 Reed-Solomon encoding	13
2.5.2 Encoding in Systematic Form	14
2.5.3 Systematic Encoding with an (n-k)-Stage Shift register	15
2.5.4 Reed-Solomon Decoding	16

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5.4.1 Syndrome Computation	17
2.5.4.2 Error Location	17
2.5.4.3 Error Values	18
2.5.4.4 Correcting the received Polynomial with Estimates of the Error Polynomial	19
2.6 Adaptive Modulation (QPSK, QAM)	19
2.6.1 คลื่นพาห้	19
2.6.2 Modulation	20
2.6.2.1 Amplitude shift keying (ASK)	20
2.6.2.2 Frequency shift keying (FSK)	20
2.6.2.3 Phase shift keying (PSK)	20
2.6.2.4 QPSK	21
2.6.2.5 ASK, PSK	22
2.7 สัญญาณรบกวน (Noise)	23
2.7.1 ทฤษฎีทางด้านสถิติและความน่าจะเป็นที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณรบกวน	24
2.7.1.1 ตัวแปรสุ่ม	24
2.7.1.2 ค่าเฉลี่ย	24
2.7.1.3 ความแปรปรวน	24
2.7.1.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	25
2.7.1.5 การแจกแจงความน่าจะเป็น	25
2.7.1.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น	26
2.7.2 สัญญาณรบกวนแบบ AWGN	26
2.7.3 ช่องสัญญาณหลายวิถี (multi-path channel)	27
2.7.3.1 คุณสมบัติของคลื่น	27
2.7.3.1.1 การสะท้อน (reflection)	27
2.7.3.1.2 การหักเห (refraction)	28
2.7.3.1.3 การเลี้ยวเบน (diffraction)	28

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.7.3.1.4 การดูดกลืน (absorption)	28
2.7.3.1.5 การสูญเสียจากร่างกายมนุษย์	28
บทที่ 3 การออกแบบและการทำงานของระบบ	30
3.1 บทนำ	30
3.2 Simulink คือ อะไร	30
3.3 การออกแบบชุดจำลองการทำงาน	31
3.1.1 ชุดส่งสัญญาณ	32
3.1.2 ชุดรับสัญญาณ	33
3.1.3 ช่องสัญญาณรบกวน	34
3.1.4 บล็อกแสดงภาพสัญญาณ	35
บทที่ 4 ผลการจำลองแบบ	36
4.1 การจำลองระบบแบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวน	36
4.1.1 ผลการจำลองที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรต์	37
4.1.2 ผลการจำลองที่ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรต์	39
4.1.3 ผลการจำลองที่ความถี่ 4.2 กิกะเฮิรต์	40
4.2 การจำลองระบบแบบช่องสัญญาณ AWGN	41
4.2.1 ผลการจำลองที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรต์	42
4.2.2 ผลการจำลองที่ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรต์	43
4.2.3 ผลการจำลองที่ความถี่ 4.2 กิกะเฮิรต์	44
4.3 การจำลองระบบแบบช่องสัญญาณ Multi-path Fading	46
4.3.1 ผลการจำลองที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรต์	47
4.3.2 ผลการจำลองที่ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรต์	48
4.3.3 ผลการจำลองที่ความถี่ 4.2 กิกะเฮิรต์	50
4.4 การจำลองระบบแบบช่องสัญญาณ Multi-path Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN	51
4.4.1 ผลการจำลองที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิรต์	52
4.4.2 ผลการจำลองที่ความถี่ 3.5 กิกะเฮิรต์	53

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.4.3 ผลการจำลองที่ความถี่ 4.2 กิกะเฮิรต์	55
บทที่ 5 สรุปผลการทำงาน	56
เอกสารอ้างอิง	57



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 บีทสัญญาณต่อการเลื่อนเฟส QPSK	22
ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราผิดพลาดต่อบิต (BER) ที่ค่า SNR ตั้งแต่ 0-10 เดซิเบล	56



VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

ภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 คุณสมบัติ Line of Sight และ Non Line of Sight	5
รูปที่ 2.2 ทิศทางการส่งข้อมูล ขาขึ้น (Uplink) และขาลง (Downlink)	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะของ FDM 9 sub-carriers	7
รูปที่ 2.4 ลักษณะของ OFDM 9 sub-carriers	7
รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมองค์ประกอบของ OFDM	8
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสเปกตรัมของแต่ละคลื่นพหุย่อย	9
รูปที่ 2.7 สัญญาณเชิงซ้อนโดเมนความถี่ ถูกแปลงฟูเรียร์ผกผัน (IFFT) ทำให้ได้เป็น สัญญาณจริงโดเมนเวลา	10
รูปที่ 2.8 การการมอดูเลต แบบ มัลติแคเรียร์ โดยใช้ การแปลงผกผันฟูริเยร์ (เฉพาะ N สัญญาณแรก) เพื่อให้ได้ สัญญาณ x_n เมื่อ n เป็นค่าเวลาใดๆ	11
รูปที่ 2.9 Reed-Solomon codes	12
รูปที่ 2.10 LFSR Encoder for a (7, 3) RS Codes	15
รูปที่ 2.11 Frequency shift keying	20
รูปที่ 2.12 Phase shift keying	21
รูปที่ 2.13 การเลื่อนของเฟส QPSK	22
รูปที่ 2.14 Quadrature Amplitude Modulation 16-QAM	23
รูปที่ 2.15 ทิศทางของรังสีตกกระทบและรังสีสะท้อน	27
รูปที่ 3.1 หน้าต่างของโปรแกรม Simulink	31
รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ส่งสัญญาณ	32
รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ	33
รูปที่ 4.1 การจำลองระบบแบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวน	36
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านการมอดูเลตแบบ QPSK ที่ความถี่ 2.5 GHz	37
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 2.5 GHz	37
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของระบบแบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 2.5 GHz	38

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวน	39
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของระบบแบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 3.5 GHz	39
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านช่องสัญญาณรบกวน 4.2 GHz	40
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของระบบ WiMAX แบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 4.2 GHz	40
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ AWGN	41
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	42
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	42
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	43
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	44
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	44
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	45
รูปที่ 4.16 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading	46
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading	47
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวน แบบ Multi-path Rayleigh Fading	48
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading	47
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวน แบบ Multi-path Rayleigh Fading	49
รูปที่ 4.21 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading	50
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวน แบบ Multi-path Rayleigh Fading	50
รูปที่ 4.23 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN	51
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และ AWGN	52

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวน แบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN	53
รูปที่ 4.26 ตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN	53
รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวน แบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN	54
รูปที่ 4.28 ตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ผ่านสัญญาณรบกวน แบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN	55
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวน แบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากซึ่งในอดีตนั้นเทคโนโลยีต่างๆทางการสื่อสารไร้สายยังไม่ค่อยแพร่หลายมากนัก แต่เนื่องจากประโยชน์ของการสื่อสารไร้สายสร้างความสะดวกและอิสระในการใช้งานและติดตั้งเครือข่าย เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายทำให้การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ภายในบ้านหรือสำนักงานเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยไม่ต้องใช้สายสัญญาณให้ยุ่งยากและดูเกะเกะ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะหรือแบบพกพาสามารถเชื่อมต่อถึงกันหรือเชื่อมต่อเข้าเครือข่ายจากตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ในรัศมีของสัญญาณได้อย่างอิสระ

เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่รู้จักกันมีอยู่หลายเทคโนโลยีเช่น IEEE 802.11, Bluetooth, GPRS, HiperLAN เป็นต้นแต่เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง คือ เทคโนโลยีความสามารถทำงานระหว่างเครือข่ายทั่วโลกสำหรับการเข้าถึงไมโครเวฟ (WiMAX) เนื่องจากระบบ WiMAX มีอัตราความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกกะบิตต่อวินาที (Mbps) และสามารถให้บริการครอบคลุมพื้นที่รัศมีได้ถึง 30 ไมล์ หรือเป็นระยะทางประมาณ 50 กิโลเมตร

ด้วยปัจจัยข้างต้น จึงเป็นเหตุให้เกิดแนวคิดที่จะศึกษาการทำงานของระบบ WiMAX โดยใช้โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์หาประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณ และอัตราความผิดพลาดต่อบิตในช่องสัญญาณแบบต่างๆ

1.2 จุดประสงค์

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณและอัตราความผิดพลาดต่อบิตของเทคโนโลยี WiMAX

1. ในช่องสัญญาณแบบต่างๆ

- AWGN
- Multi-path Fading
- ช่องสัญญาณที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อทดลองวิเคราะห์

2. ในย่านความถี่ย่อยต่างๆ

- 2.5 GHz
- 3.5 GHz
- 4 GHz

1.3 ขอบเขตและลักษณะของโครงการ

โครงการนี้เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณ และอัตราความผิดพลาดต่อบิต โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้กำหนดขอบเขตโครงการไว้ดังนี้

1. ตรวจสอบประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณ และอัตราความผิดพลาดต่อบิตของเทคโนโลยี WiMAX ในช่องสัญญาณที่กำหนดไว้

2. ตรวจสอบประสิทธิภาพการส่งผ่านสัญญาณ และอัตราความผิดพลาดต่อบิตของเทคโนโลยี WiMAX ในย่านความถี่ที่กำหนดไว้

1.4 ประโยชน์ของงาน

1. ได้รู้จักเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายแบบใหม่
2. เข้าใจระบบการทำงานของระบบ WiMAX
3. ลักษณะการงานที่ระบบ WiMAX สามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีในการใช้งาน WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) มาตรฐานเครือข่ายไร้สายในเขตเมือง หรือมาตรฐาน IEEE 802.16 คือเทคโนโลยีไร้สายความเร็วสูงล่าสุด ที่คาดว่าจะถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอนาคตอันใกล้ ต่อมามีการแตกเวอร์ชันเป็น IEEE 802.16a ซึ่งได้รับอนุมัติออกมาเมื่อเดือนมกราคม 2004 โดยสถาบันวิศวกรรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) มีรัศมีทำการ 30 ไมล์ (ประมาณ 48 กิโลเมตร) และมีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงสุด 75 เมกะบิตต่อวินาที

อย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายความว่า WiMAX จะแทนที่ Wi-Fi อย่างสมบูรณ์ เพราะแต่ละเทคโนโลยีย่อมมีความเหมาะสมในการใช้งานที่ต่างกัน และ Wi-Fi ก็ยังคงเหมาะสำหรับการใช้งานภายในบ้าน เพื่อความง่ายและสะดวกสบายในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตแบบไร้สายของสมาชิกในครอบครัว ขณะที่ WiMAX เหมาะสำหรับเครือข่ายบรอดแบนด์ภายนอก ด้วยคุณสมบัติเด่นในเรื่องรัศมีทำการที่กว้างขวางกว่า Wi-Fi

WiMAX กำหนดขึ้นภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.16 มีลักษณะการทำงานโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในการส่งข้อมูลแบบไร้สาย มีความเร็วสูงในการส่งข้อมูล ใช้ช่วงความถี่ที่สูงมากคือ 11 – 66 GHz รองรับทำงานแบบแนวระดับสายตา (Line-of-Sight) เท่านั้น แต่ต่อมาได้ทำการแก้ไขคุณสมบัติบางประการได้มาเป็น IEEE 802.16a ซึ่งใช้ช่วงความถี่ที่ต่ำลงมาเป็น 2 – 11 GHz และสามารถรองรับการทำงานที่ไม่ได้อยู่ในระดับสายตา (Non-Line-of-Sight, NLoS) หรือมีสิ่งกีดขวางได้ ซึ่งเหนือกว่า IEEE 802.16

ลักษณะที่โดดเด่นของระบบ WiMAX

- ขอบเขตการให้บริการสูงได้ถึง 50 กิโลเมตร
- ความเร็วในการส่งข้อมูลสูงถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที
- แลบลื่นวิทูที่รองรับค่อนข้างกว้าง (2-11 ,11-66 จิกกะเฮิรท์) และมีย่านความถี่ที่จัดทะเบียนแล้ว และยังไม่ได้จัดทะเบียน
- สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ได้หลากหลาย ตั้งแต่ 1.75-20 เมกะเฮิรท์
- มีความยืดหยุ่นของความถี่ย่อย และมีลักษณะแบบ Duplex mode (TDD และ FDD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 รูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่าย (Network Topology)

การเชื่อมต่อของโครงข่ายมีได้ 3 รูปแบบ คือ

2.1.1 Point to Point (PTP) เป็นการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่าง สถานีฐาน กับสถานีฐาน หรือระหว่างสถานีฐาน กับสถานีลูกข่าย รูปแบบนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อแบบส่งต่อ (Backhaul connection)

2.1.2 Point to Multipoint (PTM) เป็นการเชื่อมต่อระหว่าง สถานี กับหลายๆสถานีลูกข่าย พร้อมกัน การเชื่อมต่อนี้เป็นรูปแบบหลัก และใช้มากที่สุดของ โครงข่ายตามมาตรฐานนี้

2.1.3 Mesh Topology เป็นการเชื่อมต่อในรูปแบบตาข่าย หรือใยแมงมุม นั่นคือ นอกจาก สถานีลูกข่ายจะสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานแล้ว สถานีลูกข่ายยังสามารถติดต่อกันเองได้อีก ด้วย ซึ่งเป็นการขยายพื้นที่การให้บริการรูปแบบหนึ่ง การเชื่อมต่อนี้เป็นรูปเสริม (optional) ใน มาตรฐาน IEEE 802.16 แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก และยังไม่มียุคกรณ์ใดที่รับรองการเชื่อมต่อใน รูปแบบนี้

2.2 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Model)

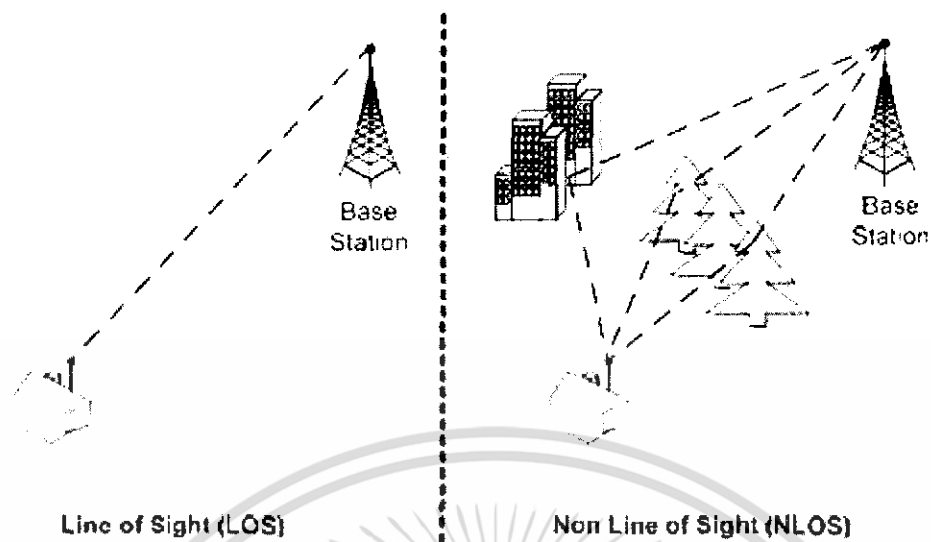
การติดต่อระหว่างสถานีฐาน กับสถานีลูกข่าย มี 2 แบบ คือ

2.2.1 การติดต่อสื่อสารที่อยู่ในแนวระดับสายตา (Line-of-Sight: LoS) เป็นการติดต่อสื่อสารที่มาจากทางตรง (Direct Path) เท่านั้นโดยปราศจากสิ่งกีดขวางใดๆ เนื่องจากสิ่งกีดขวางทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณได้

2.2.2 การติดต่อสื่อสารที่ไม่อยู่ในแนวระดับสายตา (Non-Line-of-Sight : NLoS) เป็นการติดต่อสื่อสารที่สื่อสารกัน ได้แม้ว่าจะมีสิ่งกีดขวาง สัญญาณที่ได้รับจะมาจากหลายทิศทาง ไม่ว่าจะ เป็น สัญญาณที่ถูกกีดขวางลดทอนกำลังลงไป (Absorption) สัญญาณที่อ้อมผ่านสิ่งกีดขวาง (Diffraction) และสัญญาณที่สะท้อน (Reflection) สัญญาณจากทุกทิศทางจะมีคุณสมบัติทาง กายภาพแตกต่างกัน ทั้งความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) เฟสของสัญญาณ และ Delay ของ สัญญาณ ซึ่งต้องใช้เทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนที่ด้านอุปกรณ์ภาครับ จึงจะสามารถรับ และแยก สัญญาณที่มาจากคนละทิศทางนี้ได้

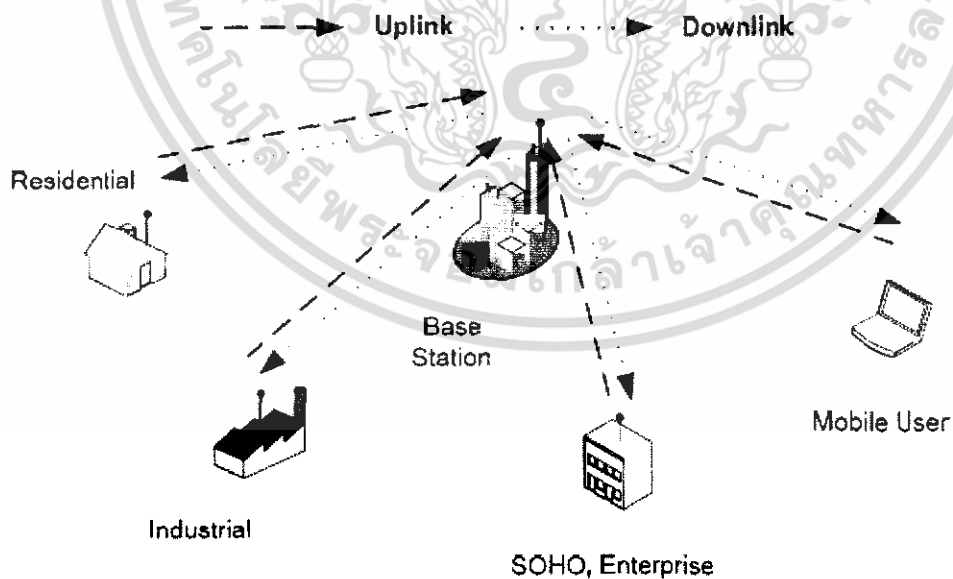
คุณสมบัติการส่งสัญญาณแบบ LoS และ NLoS มีความเกี่ยวข้องกับความถี่ที่ใช้งาน ใน กรณีที่ความถี่สูงมากกว่า 11 จิกกะเฮิรท์ การติดต่อสื่อสารต้องการ LoS เท่านั้น ส่วนคลื่นความถี่ที่ ต่ำกว่า 11 จิกกะเฮิรท์ โดยเฉพาะย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 6 จิกกะเฮิรท์ สามารถติดต่อแบบ NLoS ได้ คุณสมบัติของ NLoS ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการติดตั้ง และใช้งานอุปกรณ์ลูกข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 คุณสมบัติ Line of Sight และ Non Line of Sight

การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับลูกข่าย มีสองทิศทางคือ ขาขึ้น (Uplink) คือการส่งข้อมูลจาก สถานีลูกข่ายไปยังสถานีฐาน และขาลง (Downlink) คือการส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยัง สถานีลูกข่าย



รูปที่ 2.2 ทิศทางการส่งข้อมูล ขาขึ้น (Uplink) และขาลง (Downlink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการ Uplink กับ Downlink มี 2 รูปแบบหลัก คือ

1. **TDD (Time Division Duplex)** การส่งข้อมูลทางด้าน ขาขึ้น กับขาลง ที่ความถี่เดียวกัน แต่แบ่งการส่งคนละช่วงเวลา การส่งนั้นจะถูกแบ่งช่วงเวลาออกเป็น เฟรม (frame) และแต่ละเฟรมมีการแบ่งช่วงเวลาออกเป็น 2 เฟรมย่อย คืออัพลิงค์เฟรม และดาว์นลิงค์เฟรม การส่งข้อมูลทิศทางอัพลิงค์ จะถูกส่งในช่วงเวลา อัพลิงค์ เฟรมย่อย ขณะที่การส่งข้อมูลทิศทางดาว์นลิงค์ ส่งในช่วงเวลาดาว์นลิงค์เฟรมย่อย TDD สามารถรองรับ การปรับเปลี่ยนช่วงเวลาของเฟรมได้ คือ สัดส่วนช่วงเวลาของ อัพลิงค์ กับ ดาว์นลิงค์เฟรมย่อย สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับปริมาณ traffic ของอัพลิงค์กับ ดาว์นลิงค์ ดังนั้น TDD จึงมีความยืดหยุ่นในการจัดการแบนด์วิดท์ค่อนข้างมาก
2. **FDD (Frequency Division Duplex)** การส่งข้อมูลอัพลิงค์ กับดาว์นลิงค์ ส่งความถี่ที่ต่างกัน จึงส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันได้ นอกจากนี้ FDD ยังรองรับ CPE ที่เป็นแบบ Half-FDD คือ อุปกรณ์ลูกข่ายจะทำการส่งข้อมูล และรับข้อมูลคนละเวลา กัน คือ ขณะที่อุปกรณ์ลูกข่ายกำลังส่งข้อมูล จะไม่สามารถรับข้อมูลได้ แต่การส่งและรับข้อมูลยังใช้คนละความถี่ การใช้รูปแบบ Half-FDD อุปกรณ์จะมีราคาสูงกว่า Full-FDD เพราะส่วนประกอบภาครับสัญญาณกับทรานส์มิตเตอร์สัญญาณของอุปกรณ์สามารถใช้ ชุดเดียวกันร่วมกันได้

ในการส่งข้อมูลของ WiMAX ใช้เทคโนโลยี OFDM เป็นส่วนสำคัญ เพราะฉะนั้นเราจำเป็นต้องศึกษาว่าเทคโนโลยีชนิดนี้มีความสามารถอย่างไร

2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)

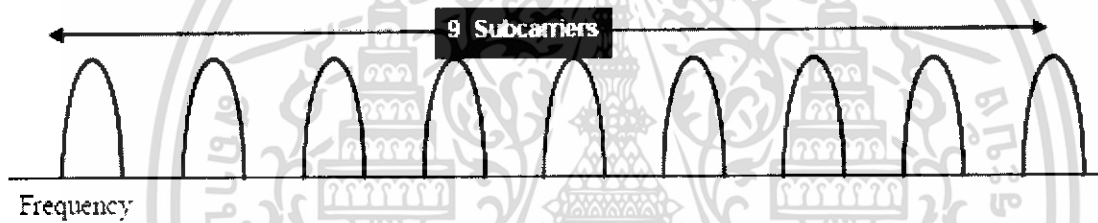
OFDM เป็นเทคนิคพิเศษของการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห้ (Multi-carrier transmission) ซึ่งสเปกตรัมที่ใช้งานทั้งหมดจะถูกแยกออกไปตามจำนวนของคลื่นพาห้ย่อย โดยที่คลื่นพาห้แต่ละชุดนั้นจะถูกมอดูเลตด้วยอัตราการส่งข้อมูลความเร็วต่ำและมีการใช้แบนด์วิดท์ที่แคบ ซึ่งเหตุผลที่สำคัญที่นิยมนำการส่งผ่านแบบ OFDM มาใช้เพราะว่ามีความทนทานต่อการประวิงเวลาแบบหลายวิธีและช่วยลดการจางหายเฉพาะความถี่ได้ รวมถึงมีการใช้งานสเปกตรัมอย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยการส่งผ่านแบบนี้จะแตกต่างกับระบบที่มีการส่งผ่านแบบคลื่นพาห้เดียวนั้นคือ เมื่อเกิดการจางหายของสัญญาณหรือมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบอาจส่งผลทำให้ระบบเชื่อมโยงทั้งหมดสูญเสียไปได้ แต่ถ้าเป็นในกรณีของการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห้ นั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อเพียงคลื่นพาห้ย่อยที่เกิดการรบกวนขึ้นเท่านั้นและไม่ทำให้ระบบทั้งหมดสูญเสียไป

OFDM มีพื้นฐานมาจาก frequency division multiplexing (FDM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หลายความถี่ส่งสัญญาณไปพร้อมกันแบบขนานโดยที่ แถบความถี่ของสัญญาณทั้งหมดจะแบ่งออกเป็นช่องสัญญาณย่อยตามความถี่ซึ่งไม่มีการเหลื่อมล้ำกัน โดยแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะถูกมอดูเลตด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

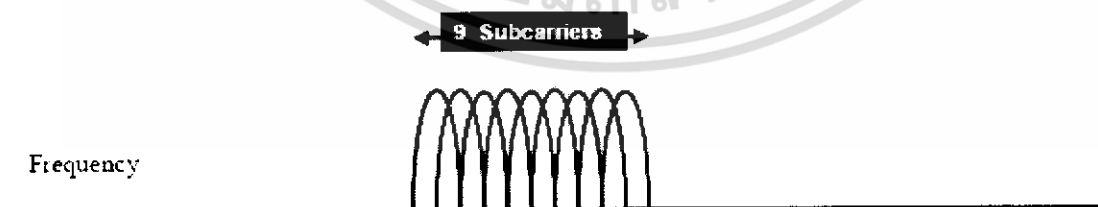
ลักษณะและสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันซึ่งเหมือนเป็นวิธีที่ดีในการหลีกเลี่ยงในการเหลื่อมล้ำกันของช่องสัญญาณความถี่ใกล้เคียง เพื่อจำกัดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงได้อย่างไรก็ดี วิธีนี้นำไปสู่การใช้งานแถบความถี่ที่ไม่มีประสิทธิภาพที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการใช้งานแถบความถี่ที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของการตั้งฉากซึ่งกันและกัน (orthogonal) ซึ่งทำให้สัญญาณความถี่ใกล้เคียงสามารถที่จะเหลื่อมล้ำกันได้และไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างช่องสัญญาณที่ติดกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างในการใช้งานแบนด์วิดท์ระหว่างการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห์แบบเดิมรูปที่ 2.3 ที่ไม่มีการเหลื่อมล้ำกันและแบบที่มีการเหลื่อมล้ำกันได้ จากรูปจะเห็นได้ว่าสามารถลดแบนด์วิดท์ได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ทำให้สามารถใช้งานแถบสเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้

เมื่อย่านความถี่ย่อย เหล่านี้ถูกส่งมาถึงภาครับสัญญาณ ทางภาครับสัญญาณจะใช้ตัวกรองสัญญาณ กรองสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องออกจากกันในแต่ละย่าน



รูปที่ 2.3 ลักษณะของ FDM 9 sub-carriers [2]

มีลักษณะคล้ายกัน FDM แต่มีประสิทธิภาพมากกว่า มีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง และประสิทธิภาพสูง โดยการใช้การทับกันของสัญญาณตามรูปที่แสดงด้านล่าง



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ OFDM 9 sub-carriers [2]

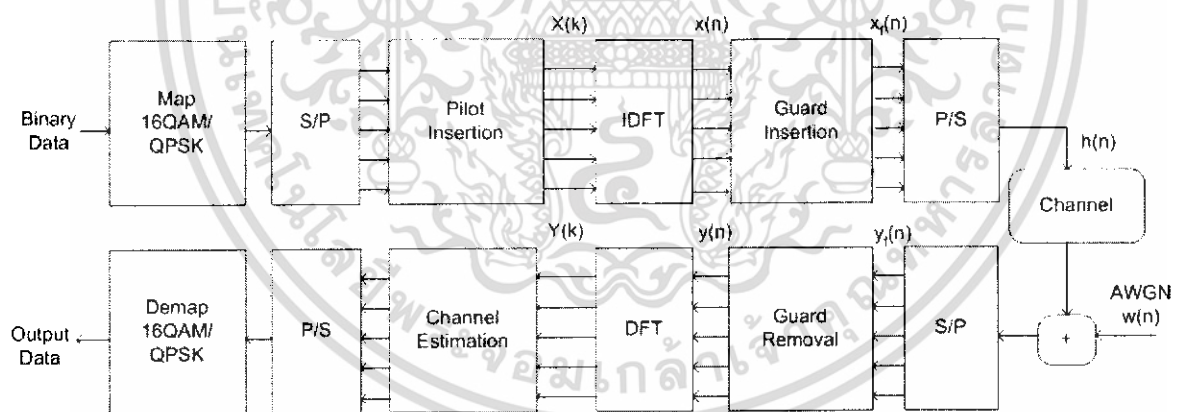
ในรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงความต้องในการใช้แบนด์วิดท์ที่น้อยลง โดยการเอา guard band ออกไป และยอมให้เกิดการทับซ้อนของสัญญาณ จะส่งเป็นแบบขนานเพื่อไม่ให้เกิดการแทรกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อของสัญญาณ ความสามารถในการส่งในแบบขนานเรียกว่า multi-carrier modulation (MCM) หรือ Discrete Multi-tone (DMT)

2.4 หลักการและโครงสร้างของ OFDM

หลักการพื้นฐานของ OFDM คือแบ่งแยกชุดสัญญาณข้อมูลความเร็วสูงให้อยู่ในรูปชุดข้อมูลความเร็วต่ำ ซึ่งจะส่งผ่านสัญญาณข้อมูลพร้อมๆ กันตามจำนวนของคลื่นพาห่อย่อย โดยจำนวนของคลื่นพาห่อย่อยเหล่านี้เกี่ยวข้องกับภาระกระจายตามความถี่ ในรูปของเวลาซึ่งเป็นเหตุทำให้การประวิงเวลาแบบหลายวิธีมีค่าลดลง เพราะช่วงเวลาที่สัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับคลื่นพาห่อย่อยที่ส่งแบบขนานนั่นเอง โดยในส่วนปัญหาที่เกิดขึ้นของการแทรกสอดระหว่างสัญญาณนั้นได้ถูกจัดการอย่างสมบูรณ์แบบที่สุดโดยการนำช่วงเวลาคูม (guard time) มาใช้งานในทุกๆ ช่วงเวลา สัญญาณ OFDM ซึ่งในช่วงเวลาคูมนี้จะมีการนำส่วนขยายแบบวน (cyclic extension) มาใช้จำกัดการแทรกสอดที่เกิดขึ้นระหว่างความถี่

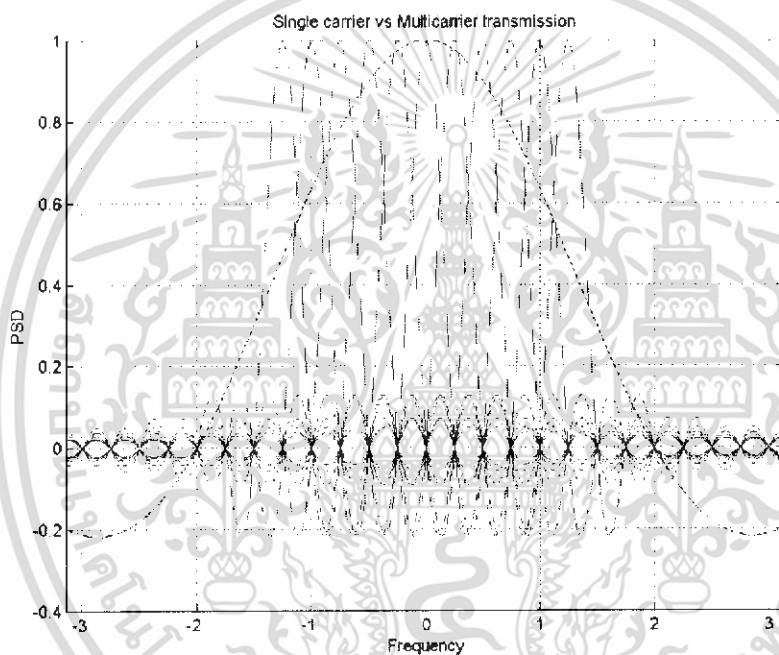
สัญญาณ OFDM ประกอบขึ้นมาจากการรวมกันในของหลายความถี่พาห่อย่อยซึ่งมีคุณสมบัติของการตั้งฉากซึ่งกันและกัน พร้อมกับมีการมอดูเลตที่อิสระต่อกันทั้งแบบดิจิตอลทางเฟส (phase shift keying: PSK) หรือการมอดูเลตแบบควอดราเจอร์ทางขนาด (quadrature amplitude modulation: QAM)



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมองค์ประกอบของ OFDM [8]

คุณสมบัติการตั้งฉากซึ่งกันและกันของแต่ละคลื่นพาห่อย่อย กล่าวคือที่ค่าสูงสุดของแต่ละคลื่นพาห่อย่อย สเปกตรัมของคลื่นพาห่อย่อยอื่นๆ จะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ซึ่งผลลัพธ์นี้จะทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันของคลื่นพาห่อย่อยที่ติดกันนั่นเอง ฉะนั้นจึงยอมรับให้มีการเหลื่อมล้ำกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และในการมอดูเลตสัญญาณในแต่ละคลื่นพาห่อย่อยนั้นเครื่องรับจะเลือกสเปกตรัมที่จุดเหล่านั้น ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของแต่ละคลื่นพาห่อย่อยซึ่งปราศจากสัญญาณรบกวนจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นพาห่อย่อยอื่นๆ และคุณสมบัติดังกล่าวนี้เองทำให้เกิดเทคนิคการส่งผ่านสัญญาณแบบ OFDM ขึ้นมา ซึ่งการสร้างสัญญาณ OFDM ให้ผลสำเร็จได้นั้นจะต้องมีการระมัดระวังควบคุม และดูแลรักษาคุณสมบัติความถี่ที่ต่างกันและกันของแต่ละคลื่นพาห่อย่อยไว้ให้ได้เสมอนั้นอาจส่งผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นระหว่างคลื่นพาห่อย่อยที่อยู่ติดกันและส่งผลกระทบต่อสื่อสารได้ ดังนั้น จึงได้มีการนำวิธีการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) มาประยุกต์ใช้งานทางด้านเครื่องส่งและเครื่องรับตามลำดับ เนื่องจากรูปแบบแบนด์คอมเพลกซ์ของสัญญาณ OFDM คือการทรานฟอร์มสัญลักษณ์อินพุต N_s QAM จากสเปกตรัมความถี่ให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลาเช่นเดียวกับวิธีการของ IFFT นั้นเอง โดยวิธีการนี้จะช่วยลดขั้นตอนความยุ่งยากและซับซ้อนในการประมวลผลนั่นเอง



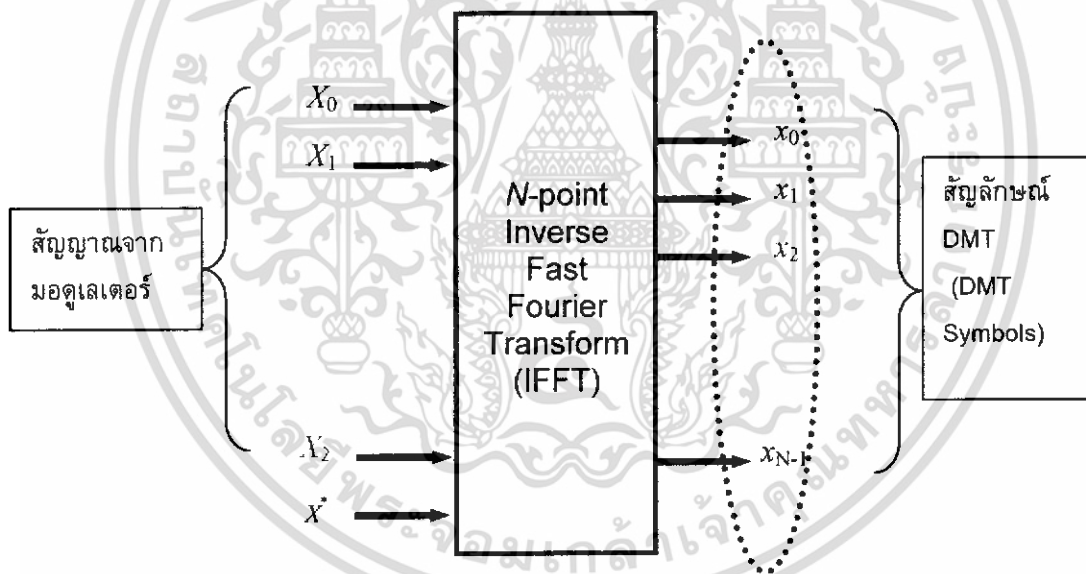
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสเปกตรัมของแต่ละคลื่นพาห่อย่อย [7]

ตัว FFT มีผลต่อลำดับการทำงานของ discrete Fourier transform (DFT) ปกติ และแบบย้อนกลับด้วย ทฤษฎีการประมวลผลดิจิทัล นั่นก็คือเราใช้ การแปลงผกผันฟูรีเยร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) กับสัญญาณเชิงซ้อนจาก QAM modulator การแปลงผกผันฟูรีเยร์ จะหมายถึงการหาค่าองค์ประกอบของสัญญาณในโดเมนเวลา (time domain) ซึ่งก็คือ สัญญาณที่จะส่งผ่านช่องการสื่อสาร จากสัญญาณในโดเมนความถี่ (frequency domain) ซึ่งได้ เป็นเอาท์พุทของ QAM โมดูเลเตอร์ เหตุที่สัญญาณนี้ถือว่าเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ นั้นหมายถึงว่า ในแต่ละสัญญาณสุ่ม (Sample) ของสัญญาณ จะถือว่าเป็นองค์ประกอบทางความถี่หนึ่งค่า ที่ฝั่งรับก็จะใช้ การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งเป็นการแปลงกลับของ IFFT เพื่อแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณในโดเมนเวลานั้นกลับไปเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ เพื่อเป็นสัญญาณอินพุท ให้กับ QAM demodulator

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

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



รูปที่ 2.7 สัญญาณเชิงซ้อน โดเมนความถี่ ถูกแปลงฟูริเยร์ผกผัน (IFFT) ทำให้ได้เป็น สัญญาณจริง โดเมนเวลา [2]

มีทฤษฎีที่ใช้คือ

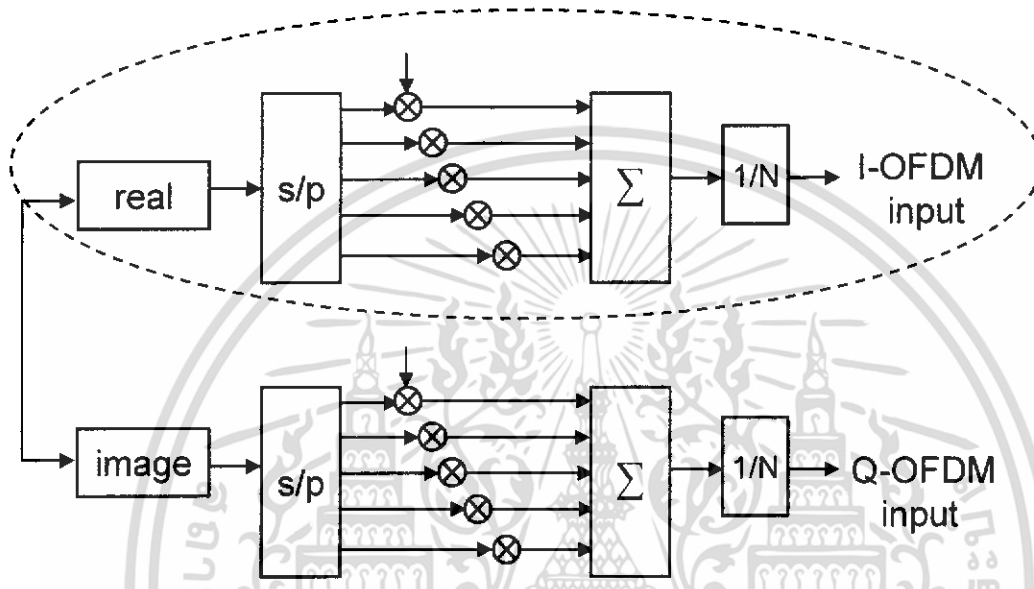
$$iDFT \ x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{2\pi i \frac{k}{N} n} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$DFT X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i \frac{n}{N} k} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.2)$$

โดย X_k เป็น QPSK signal จำนวน carrier

N เป็น จำนวน Frame (2^m)



รูปที่ 2.8 การการมอดูเลต แบบ มัลติแคเรียร์ โดยใช้ การแปลงผกผันฟูรีเยร์ (เฉพาะ N สัญญาณแรก) เพื่อให้ได้ สัญญาณ x_n เมื่อ n เป็นค่าเวลาใดๆ

ในการหาส่วนต่างๆ หาได้ดังนี้

$$X_k = a_k + ib_k \quad (2.3)$$

$$e^{\frac{2\pi i}{N} kn} = \cos(2\pi \frac{k}{N} n) + i \sin(2\pi \frac{k}{N} n) \quad (2.4)$$

$$X_k = a_k \cos(2\pi \frac{kn}{N}) + ib_k \sin(2\pi \frac{kn}{N}) \quad (2.5)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ามีค่าที่เป็นจริง และจินตภาพอยู่ ในการมอดูเลชั่นจะใช้ค่าทั้งคู่นี้ในการคำนวณ

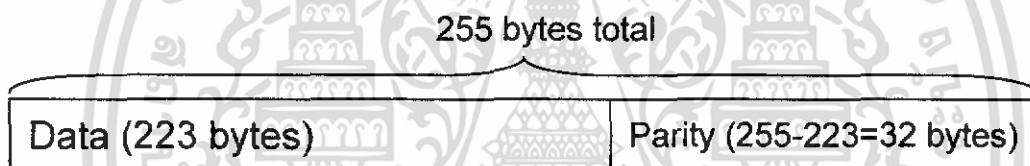
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การเข้ารหัสสัญญาณ

ในการส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสารส่วนใหญ่มีการเข้ารหัสสัญญาณด้วยกันทั้งนั้น เพื่อความปลอดภัยของข้อมูลที่อาจถูกโจรกรรมได้ ตามมาตรฐานของระบบ WiMAX ได้มีการเข้ารหัสแบบต่างๆมากมาย ในการทำงานวิจัยนี้ได้นำการเข้ารหัสแบบ Reed Solomon coding มาใช้งาน

รหัสแบบรีค – โซโลมอน (Reed-Solomon Codes: RS)

รหัสนี้เป็นรหัสส่วนที่ไม่เป็นไบนารี (Non-binary Cyclic Codes) ในส่วนสัญลักษณ์ (Symbols) ทำขึ้นบนลำดับ m -bit โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มบวกมีค่ามากกว่า 2 รหัส R-S (n, k) กระทำบนสัญลักษณ์ m -bit สำหรับทุก n และ k จะมีค่า $0 < k < n < 2^m + 2$ ที่ k คือ จำนวนสัญลักษณ์ของข้อมูลเริ่มต้นในการเข้ารหัส และ n คือ จำนวนรวมของสัญลักษณ์รหัสในบล็อกการเข้ารหัส สำหรับรูปแบบการเข้ารหัส R-S(n, k) ที่ได้เป็น $(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t)$ ที่ t คือ สัญลักษณ์ความผิดพลาดที่สามารถแก้ไขได้ของรหัส และ $n - k = 2t$ เป็นจำนวนสัญลักษณ์ของรหัสแก้ไข (Parity)



รูปที่ 2.9 Reed-Solomon codes

สำหรับรหัส R-S นี้มีระยะห่าง (Distance) ระหว่าง 2 Codeword จะกำหนดที่จำนวนสัญลักษณ์ที่แตกต่างในลำดับ จะได้ระยะห่างต่ำสุด (Minimum Distance) เป็น $d_{\min} = n - k + 1$ รหัสเหมาะแก่การตรวจแก้ไขความผิดพลาดเท่ากับ t หรือข้อผิดพลาดที่น้อยกว่า t สามารถแสดงดังนี้

$$t = \left\lfloor \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n - k}{2} \right\rfloor \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 Reed-Solomon Encoding

รูปแบบของรหัส R-S จะถูกแสดงในเทอมของคุณสมบัติ n, k, t และจำนวนเต็มบวก $m > 2$

$$(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t) \quad (2.7)$$

ที่ $n - k = 2t$ เป็นจำนวนของสัญลักษณ์พาริตีและ t คือ สัญลักษณ์ที่สามารถแก้ไขความผิดพลาดได้ของรหัส ซึ่งในการเข้ารหัสข้อมูลจะมีเงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล (Generator Polynomial) ของการเข้ารหัส R-S สำหรับทุก R-S จะมีรูปแบบ

$$g(x) = g_0 + g_1X + g_2X^2 + \dots + g_{2t-1}X^{2t-1} + X^{2t} \quad (2.8)$$

ดังนั้น จะสังเกตเห็นว่า กำลังของเงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียลจะเท่ากับจำนวนสัญลักษณ์พาริตี คือ $2t$ ให้ α เป็นรากของโพลิโนเมียลที่ถูกออกแบบ รากของ $g(X)$ เหมือน $\alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{2t}$ มันไม่จำเป็นต้องจะเริ่มต้นกับราก α เริ่มต้นกับหลายกำลังของ α ที่เป็นไปได้ พิจารณาตัวอย่างรหัส R-S(7, 3) เป็นรหัสที่มีความสามารถแก้ไขความผิดพลาด 2 เท่า พวกเราแสดงเงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียลในเทอมของ $2t = n - k = 4$ รากดังต่อไปนี้

$$g(X) = (X - \alpha)(X - \alpha^2)(X - \alpha^3)(X - \alpha^4) \quad (2.9)$$

จากนั้นทำการแก้สมการ จะได้

$$g(X) = X^4 - \alpha^0 X^2 - \alpha^1 X + \alpha^3 \quad (2.10)$$

ตามรูปแบบจะเรียงลำดับจากกำลังต่ำไปถึงลำดับกำลังสูงและเปลี่ยนเครื่องหมายลบเป็นบวก ในไบแนรีฟีลด์ $+1 = -1$ จะได้เงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล ดังนี้

$$g(X) = \alpha^3 + \alpha^1 X + \alpha^0 X^2 + \alpha^3 X^3 + X^4 \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 Encoding in Systematic Form

รหัส R-S เป็น cyclic codes การเข้ารหัสในรูปแบบระบบที่ข้อมูลข่าวสารกับรหัสแก้ไขแยกออกจากกัน (Systematic Form) จะมีกระบวนการเหมือนการเข้ารหัสไบนารี เราสามารถคิดถึงการเลื่อนโพลิโนเมียลข้อความข่าวสาร $m(X)$ เข้าไปใน k สถานะของรีจิสเตอร์ รหัสคำ (Codeword) และต่อมาเพิ่มโพลิโนเมียลรหัสแก้ไข $p(X)$ โดยวางมันในในส่วนที่เหลือ $n - k$ สถานะ เพราะฉะนั้นหากเราคูณ $m(X)$ ด้วย X^{n-k} ดังนั้น มันจะเลื่อนไปทางขวา $n - k$ ตำแหน่ง ต่อจากนั้นเราหาร $X^{n-k} m(X)$ ด้วยเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล $g(X)$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$X^{n-k} m(X) = q(X)g(X) + p(X) \quad (2.12)$$

ที่ $q(X)$ คือ โพลิโนเมียลผลลัพท์จากการหาร (Quotient Polynomial) และ $p(X)$ คือ โพลิโนเมียลเศษที่เหลือจากการหาร (Remainder Polynomial) ในกรณีไบนารีเศษที่เหลือจากการหารจะถูกจัดเป็นพริตี ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$p(X) = X^{n-k} m(X) \bmod g(X) \quad (2.13)$$

ผลลัพธ์ที่เป็น โพลิโนเมียลรหัสคำ (Codeword Polynomial, $u(X)$) สามารถเขียนได้

$$U(X) = p(X) + X^{n-k} m(X) \quad (2.14)$$

ดังนั้น จะแสดงขั้นตอนการเข้ารหัสโดยสมการข้างต้นเป็นตัวอย่าง โดยการเข้ารหัสด้วย 3 สัญลักษณ์ข้อความ

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \hline & \alpha^1 & & \alpha^1 & & \alpha^5 & & \alpha^5 \end{array}$$

การเข้ารหัส R-S (7, 3) จะใช้วิธีการที่เจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียลตามรูปแบบ $\alpha^3 + \alpha^1 X + \alpha^0 X^2 + \alpha^3 X^3 + X^4$ โดยจะทำการเริ่มต้นคูณโพลิโนเมียลข้อความที่เป็นรูปแบบ $\alpha^1 + \alpha^3 X + \alpha^5 X^2$ ด้วย $X^{n-k} = X^4$ ให้ผลเท่ากับ $\alpha^1 X^4 + \alpha^3 X^5 + \alpha^5 X^6$ ต่อจากนั้นเราหารโพลิโนเมียลข้อความด้วยเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล การแบ่งแยกโพลิโนเมียลกับตัวสัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นไบนารีลำบากกว่าไบนารี เพราะต้องการใช้การกระทำของการบวก(ลบ) และคูณ (หาร) ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปตามกฎในตารางการบวกและการคูณของกาลัวด์ฟิลด์ ในตัวอย่างสำหรับนำมาพิสูจน์ผลลัพธ์ การหารโพลิโนเมียลได้ตามโพลิโนเมียลพาริตี (Parity Polynomial)

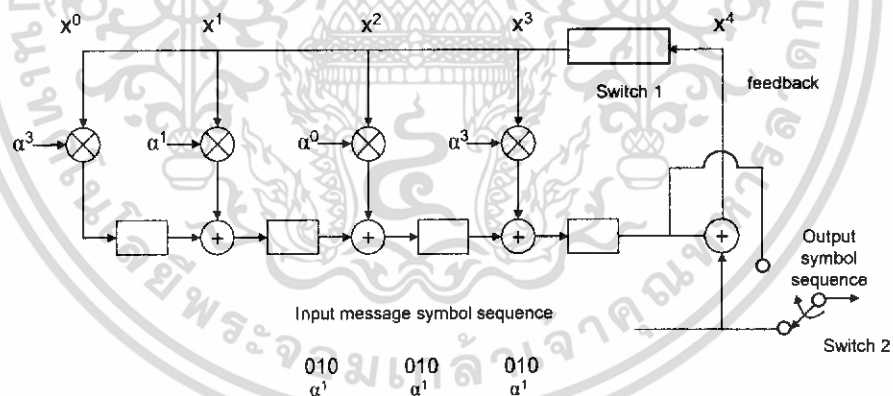
$$p(X) = \alpha^0 + \alpha^2 X + \alpha^4 X^2 + \alpha^6 X^3 \quad (2.15)$$

ดังนั้น จะได้โพลิโนเมียลรหัสคำ (Codeword Polynomial) ดังนี้

$$U(X) = \alpha^0 + \alpha^2 X + \alpha^4 X^2 + \alpha^6 X^3 + \alpha^1 X^4 + \alpha^3 X^5 + \alpha^5 X^6 \quad (2.16)$$

2.5.3 Systematic Encoding with an (n-k)-Stage Shift register

เราใช้วงจรในการเข้ารหัสข้อมูล 3 สัญลักษณ์ในรูปแบบ Systematic กับรหัส RS (7, 3) ที่ใช้เงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล $g(X) = \alpha^3 + \alpha^1 X + \alpha^0 X^2 + \alpha^3 X^3 + X^4$ สร้างเป็น วงจร Linear Feedback Shift Register (LFSR) แสดงในรูปที่ 2 มันสามารถพิสูจน์เทอรวมการคูณ มัน ใช้จากซ้ายไปขวาตรงกันกับสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียลในเงินเนอเรเตอร์ (ลำดับต่ำไปลำดับสูง) RS (7, 3) รหัสคำที่ไม่เป็นศูนย์เป็นการทำขึ้นของ $2^m - 1 = 7$ symbols และแต่ละสัญลักษณ์เป็นการกระทำขึ้นของ $m = 3$ bits



รูปที่ 2.10 LFSR Encoder for a (7, 3) RS Codes

การกระทำที่ไม่เป็นไบนารี โดยการเข้ารหัสตามรูปที่ 2 รูปแบบของรหัสคำอยู่ในรูป Systematic สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. Switch 1 “ปิด” ระหว่างเริ่ม รอบเวลา k ขอมให้เลื่อนสัญลักษณ์ข้อความไปใน (n - k) สถานะ Shift Register

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Switch 2 อยู่ในตำแหน่งล่างระหว่างเริ่มรอบเวลา k ในลำดับที่ยอมให้ย้ายสัญลักษณ์ข้อความตรงออกเอาต์พุต รีจิสเตอร์
3. หลังจากการย้ายของสัญลักษณ์ข้อความ k th ออกไปที่เอาต์พุตรีจิสเตอร์ Switch 1 “เปิด” และ Switch 2 เคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งบน
4. การเหลืออยู่ $(n - k)$ รอบเวลาเคลียส์สัญลักษณ์พาริตีบรรจุใน Shift Register โดยย้ายไปที่เอาต์พุตรีจิสเตอร์
5. จำนวนผลรวมของรอบเวลาเท่ากับ n และเนื้อหาของเอาต์พุตรีจิสเตอร์เป็นโพลิโนเมียลรหัสคำ คือ $p(X) + X^{n-k} m(X)$ ที่ $p(X)$ แสดงสัญลักษณ์พาริตีที่เพิ่มขึ้น และ $m(X)$ สัญลักษณ์ข้อความที่เข้ารหัสในรูปของโพลิโนเมียล

2.5.4 Reed-Solomon Decoding

จากการเข้ารหัสข้อมูลในรูปแบบ Systematic Codes โดยใช้รหัส RS (7, 3) ซึ่งเราได้โพลิโนเมียลรหัสคำ (Codeword Polynomial) มาตอนนี้สันนิษฐานว่าระหว่างการส่ง Codeword นี้มีความผิดพลาดในการรับสองสัญลักษณ์ (จำนวนของความผิดพลาดตรงกันกับความสามารถสูงสุดที่รหัสจะสามารถแก้ไขความผิดพลาดได้ สำหรับ 7 สัญลักษณ์ Codeword) ตัวอย่างจะมีรูปแบบความผิดพลาด $e(X)$ แสดงในรูปโพลิโนเมียลดังนี้

$$e(X) = \sum_{n=0}^6 e_n X^n \quad (2.17)$$

สำหรับตัวอย่างให้ 2 สัญลักษณ์ที่ผิดพลาดดังนี้

$$e(X) = 0 + 0X + 0X^2 + \alpha^2 X^3 + \alpha^5 X^4 + 0X^5 + 0X^6 \quad (2.18)$$

$$e(X) = (000) + (000)X + (000)X^2 + (001)X^3 + (111)X^4 + (000)X^5 + (000)X^6$$

ในรหัสคำมีหนึ่งสัญลักษณ์แก้ไขความผิดพลาด 1 บิต (ที่ α^2) และที่สัญลักษณ์ข้อมูลมีความผิดพลาด 3 บิต (ที่ α^5) การรับโพลิโนเมียลรหัสคำ (Codeword Polynomial) ที่ผิด $r(X)$ เป็นการแสดงโดยรวมเอาโพลิโนเมียล Codeword ที่ส่งมาและโพลิโนเมียลรูปแบบความผิดพลาดเข้าด้วยกัน จากตัวอย่างนี้เราจะได้

$$p(X) = \alpha^0 + \alpha^2 X + \alpha^4 X^2 + \alpha^6 X \quad (2.19)$$

$$r(X) = (100) + (001)X + (011)X^2 + (100)X^3 + (101)X^4 + (110)X^5 + (111)X^6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r(X) = \alpha^0 + \alpha^2 X + \alpha^4 X^2 + \alpha^0 X^3 + \alpha^6 X^4 + \alpha^5 X^6 \quad (2.20)$$

ในตัวอย่างนี้จะมี 4 อย่างที่เราไม่รู้ คือ 2 ตำแหน่งที่ผิดและ 2 ค่าที่ผิด ดังนั้นจะมี 4 ขั้นตอนที่จะแก้ไขปัญหาคือการถอดรหัสข้อมูลแบบ RS เพื่อแก้ไขความผิดพลาดข้อมูลที่เกิดขึ้น

2.5.4.1 Syndrome Computation

ซินโดรมเป็นผลลัพธ์ของพหุนามตรวจสอบการทำงานบน r ไปถึงกำหนดได้ว่า r เป็นสมาชิกที่สมบูรณ์ ถ้าในข้อเท็จจริง r เป็นสมาชิกซินโดรมจะมีค่า "0" ถ้าซินโดรมมีค่าไม่เป็น "0" ซึ่งบอกความผิดพลาด ซินโดรม S เป็นการทำขึ้นของ $n - k$ สัญลักษณ์ $\{S\}(i_1, \dots, n_k) \ i = 1, \dots, n - k$ ดังเช่น สำหรับรหัส R-S(7, 3) มี 4 สัญลักษณ์ในทุกเวกเตอร์ซินโดรม ค่าของมันสามารถคำนวณจากโพลิโนเมียลที่รับได้จาก $r(X)$ การคำนวณทำได้สะดวกโดยโครงสร้างของรหัส โดยใช้สมการ

$$U(X) = m(X)g(X) \quad (2.21)$$

จากโครงสร้างมันสามารถเห็นทุกโพลิโนเมียลรหัสคำ(Codeword polynomial) เป็นการคูณของเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล $g(X)$ เพราะฉะนั้นรากของ $g(X)$ ยังต้องเป็นรากของ $U(X)$ เพราะว่า $r(X) = U(X) + e(X)$ ต่อมา $r(X)$ ประเมินค่าที่แต่ละรากของ $g(X)$ จะให้ผลเป็น "0" เมื่อมันเป็นรหัสคำที่สมบูรณ์ ทุกความผิดพลาดจะมีผลลัพธ์ "1" หรือมากกว่าของการคำนวณที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่เป็นศูนย์ การคำนวณของซินโดรมแสดงดังนี้

$$S_i = r(X)_{X=\alpha^i} = r(\alpha^i) \quad i = 1, \dots, n - k \quad (2.22)$$

2.5.4.2 Error Location

สมมติว่าข้อผิดพลาด v ในรหัสคำที่ตำแหน่ง $X^{j_1}, X^{j_2}, \dots, X^{j_v}$ ต่อมาโพลิโนเมียลของความผิดพลาด $e(X)$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$e(X) = e_{j_1} X^{j_1} + e_{j_2} X^{j_2} + \dots + e_{j_v} X^{j_v} \quad (2.23)$$

ที่ตัวชี้ 1, 2, ..., v อ้างอิงไป first, second, ..., v^{th} error และตัวชี้ อ้างอิงไปตำแหน่งที่ผิดพลาดไปแก้ไข Codeword ที่ผิด แต่ละค่าความผิดพลาด e_{j_1} และตำแหน่ง X^{j_1} ที่ 1 =

1, 2, ..., v, เรานิยามจำนวนตำแหน่งความผิดพลาดที่ $\beta_i = \alpha^i$ ต่อจากนั้นเราได้รับ $n - k = 2t$ สัญลักษณ์จีนโดรมโดยแทน α^i ในโพลิโนเมียลการรับ สำหรับ $i = 1, 2, \dots, 2t$

$$\begin{aligned} S_1 &= r(\alpha) = e_{j_1} \beta_1 + e_{j_2} \beta_2 + \dots + e_{j_v} \beta_v \\ S_2 &= r(\alpha^2) = e_{j_1} \beta_1^2 + e_{j_2} \beta_2^2 + \dots + e_{j_v} \beta_v^2 \\ &\bullet \\ &\bullet \\ S_{2t} &= r(\alpha^{2t}) = e_{j_1} \beta_1^{2t} + e_{j_2} \beta_2^{2t} + \dots + e_{j_v} \beta_v^{2t} \end{aligned} \quad (2.24)$$

หนึ่งเวกเตอร์จีนโดรมที่ไม่เป็นศูนย์ (หนึ่งหรือมากกว่าของสัญลักษณ์ไม่ศูนย์) มีการคำนวณแสดงให้เห็นว่ามีความผิดพลาดการรับ ต่อไปจำเป็นที่จะต้องรู้ตำแหน่งของความผิดพลาด ทุกโพลิโนเมียลตำแหน่งผิดพลาด $\sigma(X)$ สามารถนิยามได้ดังนี้

$$\sigma(X) = (1 + \beta_1 X) + (1 + \beta_2 X) + \dots + (1 + \beta_v X) \quad (2.25)$$

$$\sigma(X) = 1 + \sigma_1 X + \sigma_2 X^2 + \dots + \sigma_v X^v \quad (2.26)$$

รากของ $\sigma(X)$ เป็น $1/\beta_1, 1/\beta_2, \dots, 1/\beta_v$ ทำนองเดียวกันกับรากของ $\sigma(X)$ เป็นจำนวนตำแหน่งที่ผิดพลาดของรูปแบบความผิดพลาด $e(X)$

2.5.4.3 Error Values

ทุกความผิดพลาดมีการแทน e_{j_i} ที่ตัวชี้บ่ง j_i อ้างอิงถึงตำแหน่งที่ผิดพลาด และตัวบ่งชี้ i ระบุ i^{th} ความผิดพลาด ตั้งแต่แต่ละความผิดพลาดเป็นคู่ที่เจาะจงตำแหน่ง เครื่องหมายทำเหมือนกับ e_{j_i} เหมือนที่ e_i เตรียมการถึงการกำหนดค่าความผิดพลาด e_1 และ e_2 เข้ากับตำแหน่ง $\beta_1 = \alpha^3$ และ $\beta_2 = \alpha^4$ ทุกของ 4 ซิมโดรมสามารถใช้สมการได้

$$e_{j_i} = \frac{Z(\beta_i^{-1})}{\prod_{i=1}^v (1 + \beta_i \beta_i^{-1})} \quad (2.27)$$

โดยที่

$$Z(X) = (S_1 + \sigma_1)X + (S_2 + \sigma_1 S_1 + \sigma_2)X^2 + \dots + (S_v + \sigma_1 S_{v-1} + \sigma_2 S_{v-2} + \dots + \sigma_v)X^v$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4.4 Correcting the received Polynomial with Estimates of the Error

Polynomial

รูปแบบโพลิโนเมียลความผิดพลาดที่ประมาณได้ให้เป็นไปดังนี้

$$\hat{e}(X) = e_1 X^1 + e_2 X^2 \quad (2.28)$$

$$\hat{e}(X) = \alpha^2 X^3 + \alpha^5 X^4 \quad (2.29)$$

การแสดงวิธีการแก้ไขโพลิโนเมียลที่รับได้ ให้ประมาณทุกค่าของ Codeword ที่ส่งออกและสุดท้ายส่งข้อความที่ถอดรหัสออกมา ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{U}(X) &= r(X) + \hat{e}(X) = U(X) + e(X) + \hat{e}(X) \\ r(X) &= (100) + (001)X + (011)X^2 + (100)X^3 + (101)X^4 + (110)X^5 + (111)X^6 \\ \hat{e}(X) &= (000) + (000)X + (000)X^2 + (001)X^3 + (111)X^4 + (000)X^5 + (000)X^6 \\ \hat{U}(X) &= (100) + (001)X + (011)X^2 + (100)X^3 + (101)X^4 + (110)X^5 + (111)X^6 \\ &= \alpha^0 + \alpha^2 X + \alpha^4 X^2 + \alpha^6 X^3 + \alpha^1 X^4 + \alpha^3 X^5 + \alpha^5 X^6 \quad (2.30) \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นสัญลักษณ์ข้อความประกอบด้วย $k = 3$ สัญลักษณ์ สามารถถอดข้อความได้เป็น

$$\underbrace{010110111}_{\alpha^1 \quad \alpha^3 \quad \alpha^5}$$

2.6 Adaptive Modulation (QPSK, QAM)

เทคนิคการมอดูเลชันที่ใช้ใช้ในการสื่อสารแบบต่างๆ ประกอบด้วยแบบ quadrature phase shift keying (QPSK) และ แบบ quadrature amplitude modulation (QAM) การมอดูเลทแบบที่กล่าวมานี้ มีคุณสมบัติต่างกันไปตามแต่วิธีการ เช่น ทนต่อสัญญาณรบกวนได้สูง สามารถเพิ่มความจุและความเร็วในการส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายไร้สายได้

2.6.1 คลื่นพาห้

คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับแสงในรูปของซายน์เวฟและสามารถนำพาข้อมูลไปได้ด้วย คลื่นวิทยุสามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวาง อย่างกำแพงหรือสิ่งปลูกสร้างอื่นได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 Modulation

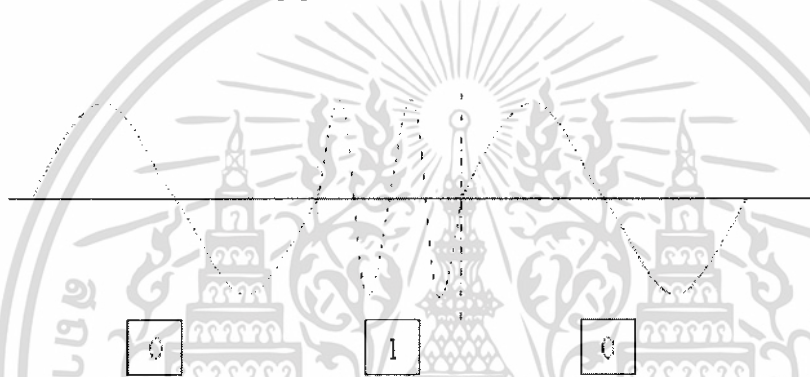
การมอดูเลชัน คือกระบวนการที่ใช้คลื่นพาห้เป็นตัวนำพาข้อมูล หรือสัญญาณดิจิทัล มีวิธีการพื้นฐานอยู่ 3 แบบ คือ แอมพลิจูดชฟท์คีย์อิง, ฟริควเอนซีชฟท์คีย์อิง และ เฟสชฟท์คีย์อิง การเข้ารหัสของการมอดูเลชัน จะให้เข้ารหัสเป็น บิตต่อสัญลักษณ์ หรือบิตต่อระยะเวลา

2.6.2.1 Amplitude shift keying (ASK)

เป็นการม้วนรวมเอาแอมปริจูด (กำลังงาน) ของคลื่นดิจิทัล (low = 0, high = 1) ใ้กับระบบคลื่นวิทยุ AM

2.6.2.2 Frequency shift keying (FSK)

ระบบนี้ใ้กับการกระจายเสียงวิทยุระบบ FM เป็นการมอดที่มมีความโน้มเอียงของสัญญาณรบกวนย้อนกลับ เนื่องจากสัญญาณรบกวนมีการเปลี่ยนตำแหน่งบ่อยครั้งในช่วงสัญญาณ

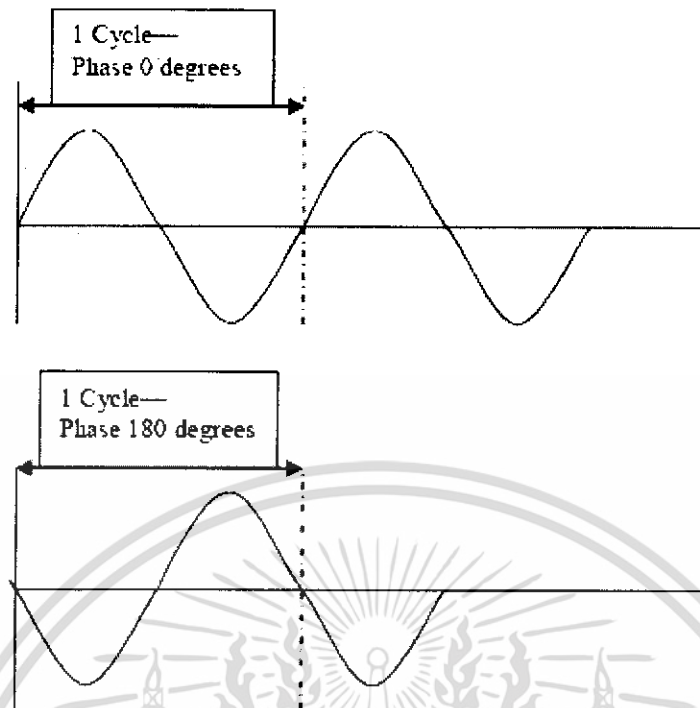


รูปที่ 2.11 Frequency shift keying

ในรูปที่ 2.11 ใ้เห็นความแตกต่างของบิต เป็นความถี่ที่ต่างกันซึ่งตรวจจับได้โดยภาครับสัญญาณ

2.6.2.3 Phase shift keying (PSK)

สัญญาณดิจิทัลจะส่งข้อมูลเป็นรหัสไบนารี binary phase shift keying (BPSK) แต่ละสัญลักษณ์จะแสดงสถานะความแตกต่าง 2 สถานะ หรือ 1 บิตต่อสัญลักษณ์ คือที่ 0 องศา แทนด้วยบิต 0 และที่ "180" องศา แทนด้วย "1"

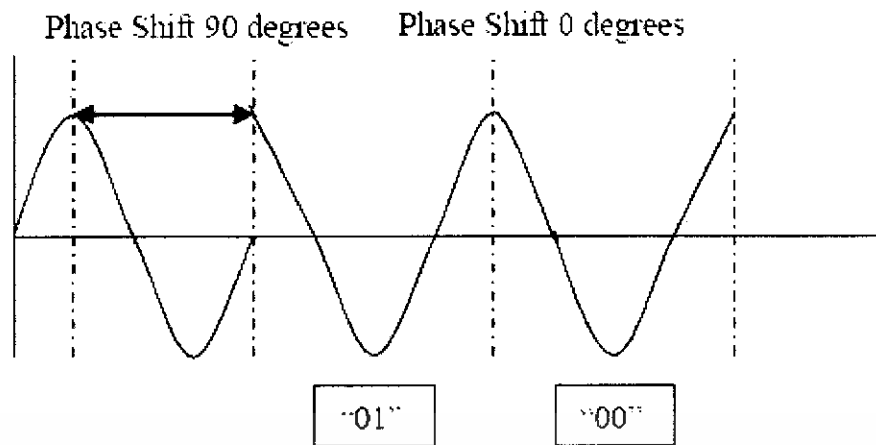


รูปที่ 2.12 Phase shift keying

ในรูปที่ 2.12 คลื่นลูกที่ 2 เป็นการเลื่อนโดยครึ่งเวลา หรือ 180 องศา เครื่องรับสัญญาณสามารถยอมรับสถานะแบบนี้ได้ทั้งคู่ 0, 1

2.6.2.4 QPSK

QPSK จะส่งสัญญาณเป็นสัญลักษณ์ๆละ 2 บิต ออกไปพร้อมกัน จะมีการรวมรหัส 4 คู่ คือ 00, 01, 10 และ 11 รหัสเหล่านี้เทียบได้กับเฟส 4 เฟส ของ QPSK บิตต่างๆมีความสัมพันธ์กันกับการเลื่อนเฟส โดยที่บิตแต่ละบิตจะดูการเลื่อนของเฟสก่อนหน้า คือถ้าเฟสก่อนหน้ามีการเลื่อนเฟส 90 องศา บิตที่เกิดเท่ากับบิต 01 เมื่อเกิดเฟสหักไปหากไม่มีการเลื่อนเฟสก่อนหน้าก็จะได้บิต 00 ดังแสดงตามรูปด้านล่าง



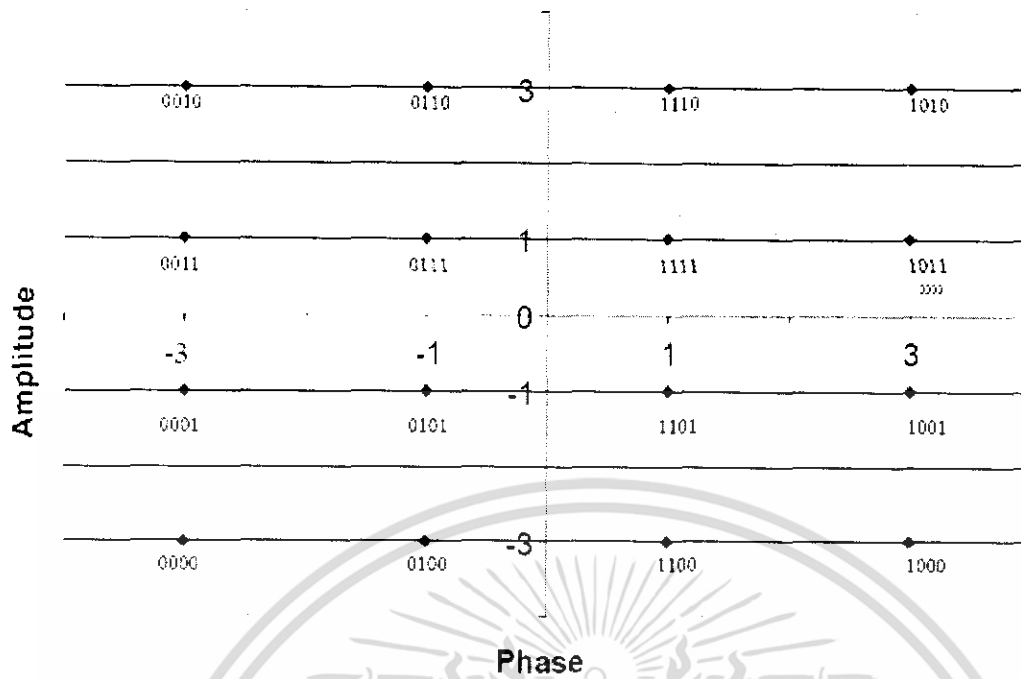
รูปที่ 2.13 แสดงการเลื่อนของเฟส QPSK

ตารางที่ 2.1 บิตสัญลักษณ์ต่อการเลื่อนเฟส QPSK

Symbol	Phase Shift
00	0 degrees
01	90 degrees
11	180 degrees
10	270 degrees

2.6.2.5 ASK, PSK

สามารถรวมกันแล้วสร้างเป็น QAM เมื่อเฟสและแอมพลิจูดของทั้งคู่เปลี่ยนแปลง ตัวรับสัญญาณจะรับสัญญาณที่ถูกมอดูเลต แล้วตรวจสอบการเลื่อน และแปลงสัญญาณให้เป็นสายข้อมูลเดิม



รูปที่ 2.14 Quadrature Amplitude Modulation 16-QAM

รูปที่ 2.14 แสดงการเข้ารหัสแบบ 16-QAM จะแบ่งตามจตุรภาค 4 จตุรภาค ในแต่ละจตุรภาคจะมี 4 สัญลักษณ์ แต่ละหนึ่งสัญลักษณ์เทียบเท่า 2 QPSK

ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาการเข้ารหัสจาก 16-QAM มาเป็น 64-QAM เพื่อเพิ่มสมรรถภาพการทำงานให้สามารถส่งได้เร็วขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการทนต่อสัญญาณรบกวนได้ต่ำ โดยปรับให้แต่ละจตุรภาคจะมี 8 สัญลักษณ์

2.7 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นอยู่เสมอในระบบการสื่อสาร และจะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งนี้สัญญาณรบกวนเกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อยู่ เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์ และไดโอด เป็นต้น ล้วนเป็นต้นกำเนิดของสัญญาณรบกวนทั้งสิ้น นอกจากนี้สัญญาณรบกวนยังสามารถเกิดขึ้นจากภายนอกอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 ทฤษฎีทางด้านสถิติและความน่าจะเป็นที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนมีผลให้ข้อมูลข่าวสารมีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะเป็นการสุ่ม ดังนั้นการวิเคราะห์จะใช้วิธีทางด้านสถิติและความน่าจะเป็นมาประยุกต์ดังนี้

2.7.1.1 ตัวแปรสุ่ม คือ ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยข้อมูลแต่ละจุดของสัญญาณรบกวน โดยค่าของตัวแปรสุ่มต้องอยู่ในขอบเขตของสัญญาณรบกวน

2.7.1.2 ค่าเฉลี่ย ถ้าให้สัญญาณรบกวนเป็นฟังก์ชัน $n(t)$ มีค่าอยู่ในช่วง t_1 ถึง t_2 จะได้สมการหาค่าเฉลี่ย ดังนี้

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบอนาล็อก

$$\bar{n} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} n(t) dt \quad (2.31)$$

ถ้าในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบดิจิตอล ให้สัญญาณรบกวนทั้งหมด N จุดโดยมีค่าเป็น n_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ จะได้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนเป็น

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (2.32)$$

2.7.1.3 ความแปรปรวน

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบอนาล็อก

$$\sigma^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [n(t) - \bar{n}]^2 dt \quad (2.33)$$

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบดิจิตอล

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [n_i - \bar{n}]^2 \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบอนาล็อก

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [n(t) - \bar{n}]^2 dt} \quad (2.35)$$

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบดิจิตอล

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [n_i - \bar{n}]^2} \quad (2.36)$$

2.7.1.5 การแจกแจงความน่าจะเป็น คือ ความน่าจะเป็นในการเกิด $P(x)$ ใด เมื่อ $X \leq x$ โดยใช้สัญลักษณ์ $F_x(x)$ ซึ่ง

$$F_x(x) = P\{X \leq x\} \quad (2.37)$$

โดยคุณสมบัติที่สำคัญของค่า $F_x(x)$ คือ

1. $F_x(-\infty) = 0$
2. $F_x(\infty) = 1$
3. $0 \leq F_x(x) \leq 1$
4. $F_x(x_1) \leq F_x(x_2)$ เมื่อ $x_1 < x_2$
5. $P\{x_1 < x \leq x_2\} = F_x(x_2) - F_x(x_1)$
6. $F_x(x^+) = F_x(x)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx} \quad (2.38)$$

โดยคุณสมบัติที่สำคัญของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ

1. $0 \leq f_x(x)$
2. $\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = 1$
3. $F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(\lambda) d\lambda$
4. $P\{x_1 < x \leq x_2\} = F_x(x_2) - F_x(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f_x(\lambda) d\lambda$

2.7.2 สัญญาณรบกวนแบบ AWGN

สัญญาณรบกวนแบบ AWGN (Add White Gaussian Noise) คือ สัญญาณรบกวนแบบที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในรูปของสมการ

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.39)$$

และมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

$$\begin{aligned} F_x(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(\lambda-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} d\lambda \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{\frac{x-\bar{x}}{\sigma}} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \end{aligned} \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

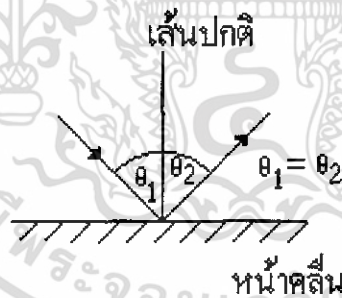
2.7.3 ช่องสัญญาณหลายวิถี (multi-path channel)

ช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารไร้สาย จะใช้อากาศเป็นช่องสัญญาณ ดังนั้น ผลตอบสนองของช่องสัญญาณจึงไม่คงที่ เนื่องจากหลายๆ ปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นสภาพอากาศ ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ สภาพแวดล้อมรอบๆ ระบบการสื่อสาร การสูญเสียทางด้านต่างๆ เช่นการสูญเสียของพลังงานเนื่องจากระยะทาง การสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อน การงอหาย การหักเห การเลี้ยวเบน การดูดกลืน หรือการสูญเสียเนื่องจากผลกระทบของร่างกายมนุษย์ ฯลฯ ดังนั้นช่องสัญญาณที่ใช้งานจึงประกอบด้วยสัญญาณจากหลายทิศทาง หรืออาจเรียกได้ว่า ช่องสัญญาณหลายวิถี ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อช่องสัญญาณ สามารถกล่าวได้ดังนี้

2.7.3.1 คุณสมบัติของคลื่น

2.7.3.1.1 การสะท้อน (reflection)

การสะท้อนคือ การที่คลื่นกระทบกับตัวกลางที่ต่างกันแล้วเคลื่อนที่กลับมาในตัวกลางเดิม ซึ่งคลื่นที่สะท้อนกลับมาจะเรียกว่า คลื่นสะท้อน ส่วนประกอบของการสะท้อน คือ รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นปกติ ลักษณะการสะท้อนสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 11 โดยที่ เส้นตรงกลางคือเส้นปกติ รังสีทางซ้ายคือรังสีตกกระทบ และรังสีทางขวาคือรังสีสะท้อน ซึ่งมุมทั้ง 2 มุมนั้น จะเรียกว่ามุมตกกระทบและมุมสะท้อน ตามลำดับโดยค่ามุมทั้ง 2 นั้นจะมีค่าเท่ากันเมื่อตัวกลางมีผิวเรียบ ไม่ขรุขระ



รูปที่ 2.15 ทิศทางของรังสีตกกระทบและรังสีสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3.1.2 การหักเห (refraction)

การหักเหคือ การที่คลื่นเปลี่ยนทิศทางการเดินทาง เมื่อคลื่นมีการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางมากกว่า 1 ตัวกลางขึ้นไป ซึ่งก็คล้ายกับการสะท้อนแต่รังสีของคลื่นไม่สะท้อนกลับไปยังตัวกลางเดิมแต่จะหักเหเข้าสู่ยังตัวกลางใหม่ ซึ่งมุมหักเหอาจจะไม่เท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลาง

2.7.3.1.3 การเลี้ยวเบน (diffraction)

การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ คลื่นที่ส่งออกไปจากเครื่องส่งกระทบกับขอบของวัสดุหรือสิ่งกีดขวาง ทำให้สัญญาณเลี้ยวเบนออกไปจากเส้นทางเดิม เป็นผลให้เครื่องรับไม่สามารถรับคลื่นสัญญาณได้แม้อยู่ในเส้นทางเดียวกัน หรือเครื่องรับสามารถรับคลื่นสัญญาณได้แม้ไม่ได้อยู่ในเส้นทางเดียวกัน แต่แอมพลิจูดของคลื่นสัญญาณที่รับได้จะลดทอนลงจากที่ควรจะเป็น

2.7.3.1.4 การดูดกลืน (absorption)

การดูดกลืนก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณ ซึ่งการดูดกลืนมีหลายลักษณะไม่ว่าจะเป็นการดูดกลืนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานความถี่เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือจะเป็นการดูดกลืนสัญญาณจากวัสดุที่อยู่รอบๆ ระบบการสื่อสาร

2.7.3.2 การสูญเสียจากร่างกายมนุษย์

ร่างกายมนุษย์เปรียบเสมือนวัตถุชิ้นหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งการที่เคลื่อนที่ได้นี้เองทำให้ลักษณะของการสื่อสารไร้สายที่เครื่องรับและเครื่องส่งไม่มีการเคลื่อนที่ เปลี่ยนเป็นการสื่อสารเคลื่อนที่ และยังทำให้ผลตอบสนองของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงที่เลวร้ายกว่าไม่มีผลกระทบจากร่างกายมนุษย์ เนื่องจากร่างกายมนุษย์เปรียบเสมือนวัตถุหลายๆ ชนิด หลายชิ้นมาประกอบรวมกัน การที่กล่าวเช่นนี้เพราะ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ค่าการหักเห สภาพยอมทางไฟฟ้า และอื่นๆ ในแต่ละส่วนของร่างกายมนุษย์มีไม่เท่ากัน ทำให้เมื่อคลื่นเดินทางผ่านร่างกายมนุษย์แล้ว ผลตอบสนองของช่องสัญญาณมีความแตกต่างกันออกไป ในทุกๆ ขณะเวลา ดังนั้น ผลตอบสนองสัญญาณเมื่อสภาพแวดล้อมประกอบไปด้วยร่างกายมนุษย์ถือว่าเป็นผลตอบสนองที่แย่ที่สุด

โดยมีสมการหาช่องสัญญาณของ Multi-path channel ได้ดังนี้

$$h(t) = \sum_{k=0}^K \alpha \delta(t - \tau_k) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $h(t)$ คือ ช่องสัญญาณของ Multi-path channel
 K คือ จำนวนเส้นทาง
 α คือ เกณฑ์ของ Multi-path (จุดสูงสุดของแต่ละเส้นทาง)
 δ คือ ขนาดของเส้นทางที่ความสูงไม่จำกัด แต่ขนาดเท่ากับ 1
 t คือ ช่วงเวลาทั้งหมด
 τ_k คือ ช่วงเวลาของแต่ละเส้นทางจากจุดเริ่มต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการทำงานของระบบ

3.1 บทนำ

จากการศึกษาลักษณะการทำงานของระบบ WiMAX เราได้ออกแบบ แบบจำลองของระบบ WiMAX ซึ่งประกอบด้วยภาคส่งสัญญาณ และช่องสัญญาณแบบต่างๆ โดยใช้เทคโนโลยี OFDM และใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้ออกมาเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของช่องสัญญาณ และอัตราความผิดพลาดบิต

ในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบ แบบจำลองเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งขึ้น โดยนำโปรแกรม Simulink ของ MATLAB มาใช้ในการออกแบบชุดการทดลอง ตามที่หัวข้อได้ตั้งไว้

การนำโปรแกรม Simulink มาใช้ก็เพื่อให้ผู้ที่ทำการทดลองได้เห็นรูปแบบการทำงานที่ง่ายขึ้นของระบบ โดยแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมในส่วนต่างๆ ความสำคัญของโปรแกรม Simulink จึงเกิดขึ้น คำนั้น มาดูกันว่า Simulink คืออะไร

3.2 Simulink คืออะไร

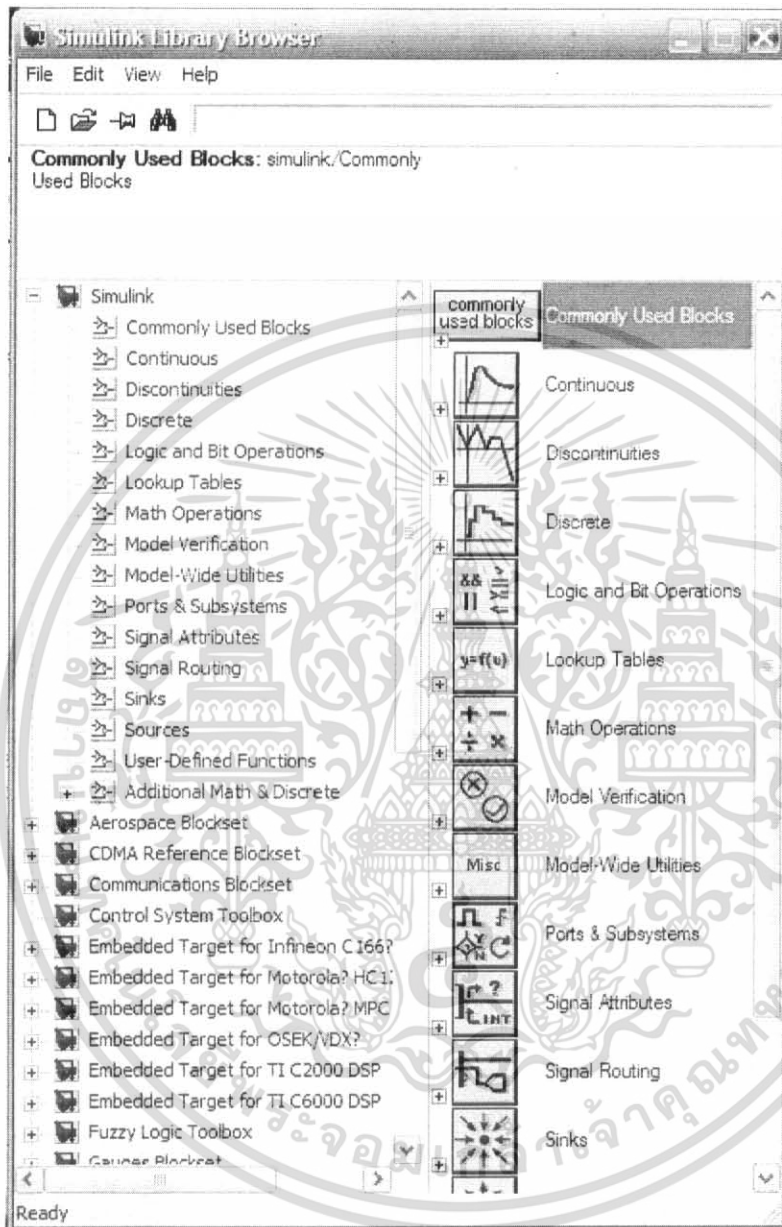
Simulink เป็นโปรแกรมอีกส่วนหนึ่งที่อยู่ใน MATLAB ใช้ในการออกแบบ จำลอง และวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวกับพลังงานในรูปแบบต่างๆ ทั้งยังสามารถสนับสนุนการทำงานที่เป็นทั้งเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น และรูปแบบของเวลา ระบบยังสามารถทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าที่แตกต่างกันได้อีกด้วย แต่ในการทำงานวิจัยนี้เราได้เน้นไปในส่วนของบล็อกที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร

สำหรับการออกแบบ Simulink สามารถทำได้โดยง่ายเพียงแค่ลากบล็อกที่ต้องการออกแบบนำมาต่อกันได้เลย เพราะในโปรแกรม Simulink มีบล็อกสำเร็จรูปอยู่แล้ว โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม เพียงแค่กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละบล็อกตามที่ต้องการเท่านั้น แต่ถ้าต้องการสร้างบล็อกไดอะแกรมขึ้นเอง ไม่อยากใช้บล็อกที่โปรแกรมมีให้ ก็สามารถทำได้ เพราะในตัวโปรแกรมเองก็ไม่ได้มีบล็อกทุกชนิดตามที่เรต้องการทั้งหมด โดยมีฟังก์ชัน S-functions เอาไว้ให้สำหรับสร้างบล็อกของเราเองได้

ในการออกแบบต้องออกแบบตามลำดับขั้นในการปรับค่าต่างๆของบล็อกไดอะแกรมทำได้โดยเพียงแค่ดับเบิ้ลคลิกที่บล็อกไดอะแกรม จากนั้นตัวบล็อกจะขึ้นหน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์ให้ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละบล็อกไดอะแกรมได้มาจากการคำนวณ หรือค่ามาตรฐานที่ถูกระบุไว้แล้ว และค่าพารามิเตอร์จะมีความสัมพันธ์กันซึ่งกันและกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดค่าต่างๆในแต่ละพารามิเตอร์เสร็จหมดแล้วก็สามารถประมวลผลได้เลย แต่ถ้าเกิดมีข้อมูลผิดพลาดก็จะมีผลแสดงออกมาว่าผิดที่จุดไหน สามารถวิเคราะห์ ออกแบบ ปรับปรุงใหม่ได้



รูปที่ 3.1 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Simulink

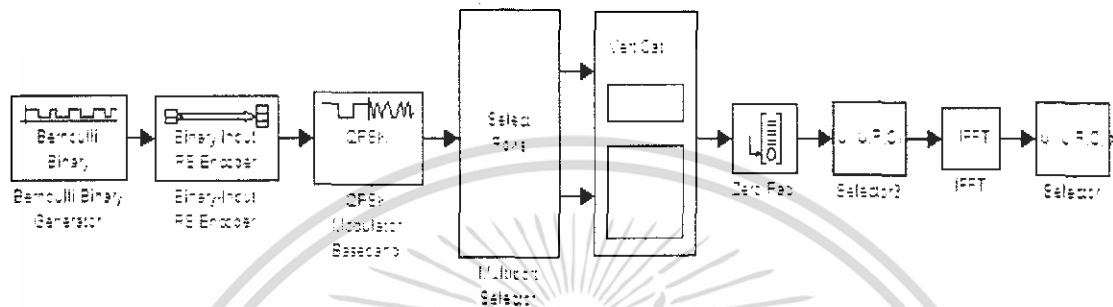
3.3 การออกแบบชุดจำลองการทำงาน

การออกแบบชุดจำลองการทำงานได้ทำการออกแบบเป็น 2 ช่วงด้วยกัน คือ ในส่วนของชุดส่งสัญญาณ และชุดรับสัญญาณ โดยผ่านการรวบรวมสัญญาณ โดยใช้บล็อกไดอะแกรมที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ชุดส่งสัญญาณ

ระบบ WiMAX ได้ใช้วิธีการของเทคโนโลยี OFDM มาใช้ในการส่งข้อมูลที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยออกแบบบน Simulink ของโปรแกรม MATLAB ดังรูป



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

บล็อกต่างๆที่มีหน้าที่แตกต่างกันไป ดังนี้

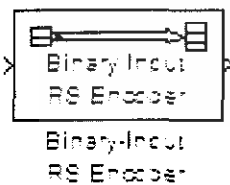
3.1.1.1 ภาพบล็อกอุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณ

3.1.1.1.1. Bernoulli Binary



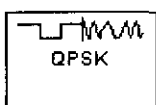
สร้างสัญญาณข้อมูลอินพุตในรูปแบบอินทิจอร์

3.1.1.1.2. Integer-Input RS Encoder



เข้ารหัสสัญญาณข้อมูลแบบ Reed-Solomon

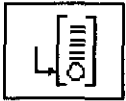
3.1.1.1.3. QPSK Modulator Baseband



มอดูเลตสัญญาณที่เข้ารหัสแล้ว

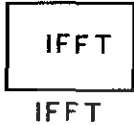
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1.4. Zero Pad



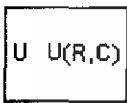
เติมส่วนของข้อมูลให้มีขนาดตามที่กำหนด

3.1.1.1.5. IFFT



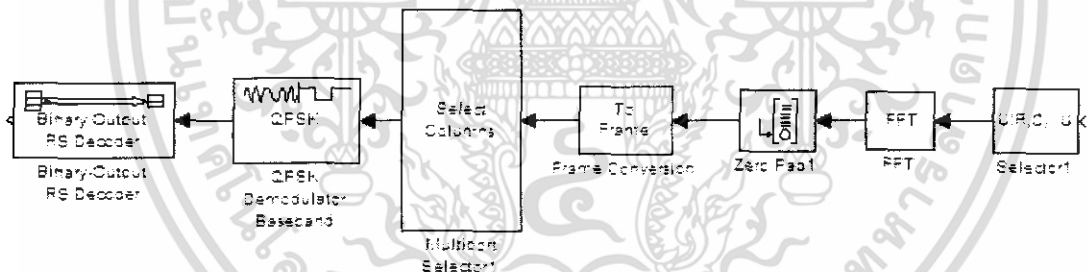
เปลี่ยนโดเมนความถี่เวลาให้เป็นโดเมนเวลา

3.1.1.1.6. Selector



จัดตำแหน่งของข้อมูลในรูปแบบเมตริก

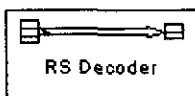
3.1.2 ชุดรับสัญญาณ



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณ

3.1.2.1 ภาพบล็อกอุปกรณ์ภาครับสัญญาณ

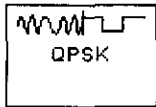
3.1.2.1.1. Binary-Output RS Decoder



ถอดรหัสสัญญาณข้อมูลแบบ Reed-Solomon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1.2. QPSK Demodulator Baseband



คีมอดคูเลตสัญญาณแบบ QPSK

3.1.2.1.3. Frame conversion



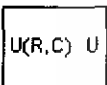
จัดรูปแบบเฟรมข้อมูลให้เป็นแบบ Frame-base

3.1.2.1.4. FFT



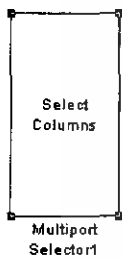
เปลี่ยนโดเมนทางเวลาให้เป็นโดเมนทางความถี่

3.1.2.1.5. Selector



จัดตำแหน่งของข้อมูลในรูปแบบเมตริก

3.1.2.1.6. Multi-port Selector

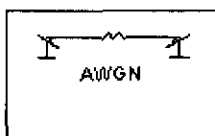


เปลี่ยนข้อมูลแบบอนุกรมเป็นข้อมูลแบบขนาน

3.1.3 ภาพบล็อกช่องสัญญาณรบกวน

ความหมายของช่องสัญญาณที่ใช้ได้อธิบายไว้ใน บทที่ 2 แล้ว

3.1.3.1. AWGN



การสูญเสียในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

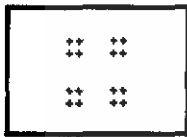
3.1.3.2. Multi-path Rayleigh Fading



ช่องสัญญาณแบบการกระจายหลายวิถี

3.1.4 ภาพบล็อกอุปกรณ์แสดงสัญญาณ

3.1.4.1. Discrete-Time Scatter Plot Scope



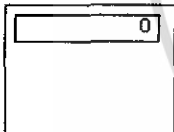
แสดงการกระจายของสัญญาณ

3.1.4.2. Spectrum Scope



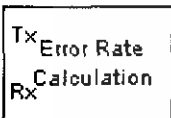
แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ

3.1.4.3. Display



แสดงอัตราความผิดพลาดการส่งข้อมูล

3.1.4.4. Error Rate Calculation



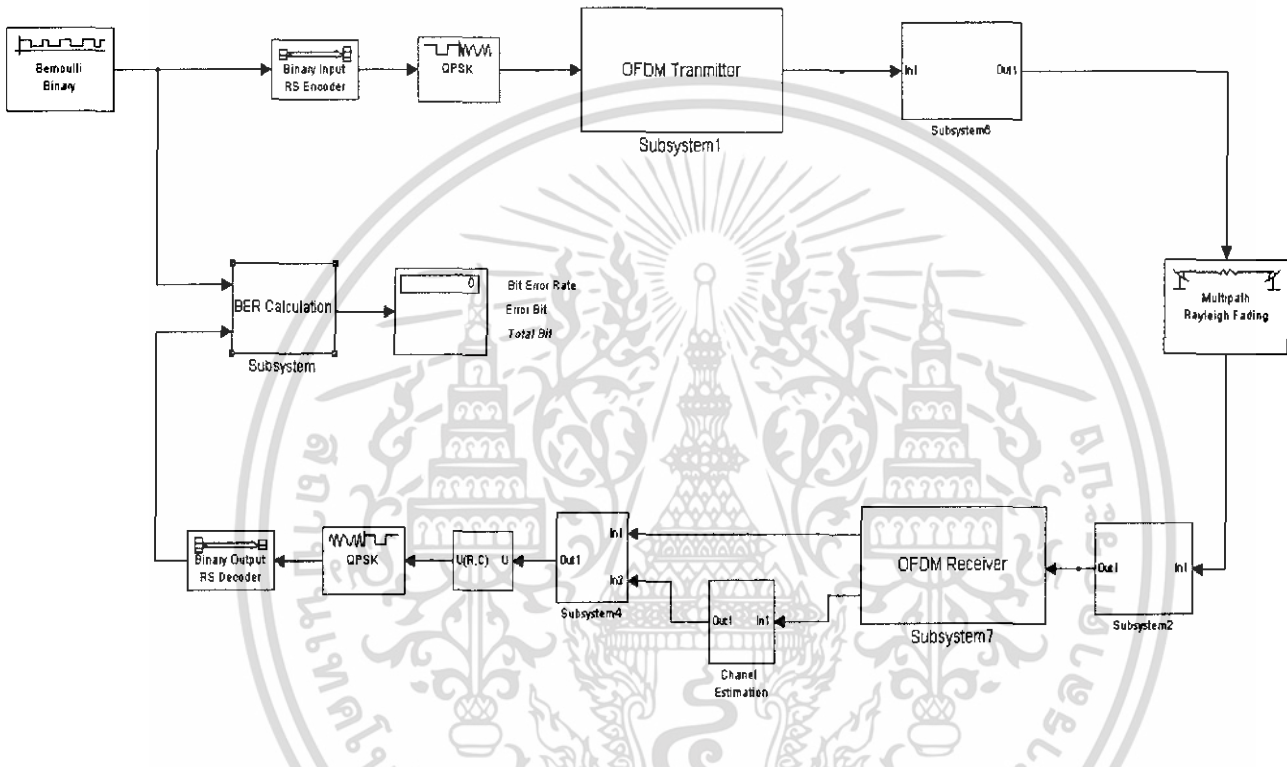
ใช้คำนวณอัตราความผิดพลาดการส่งข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวน



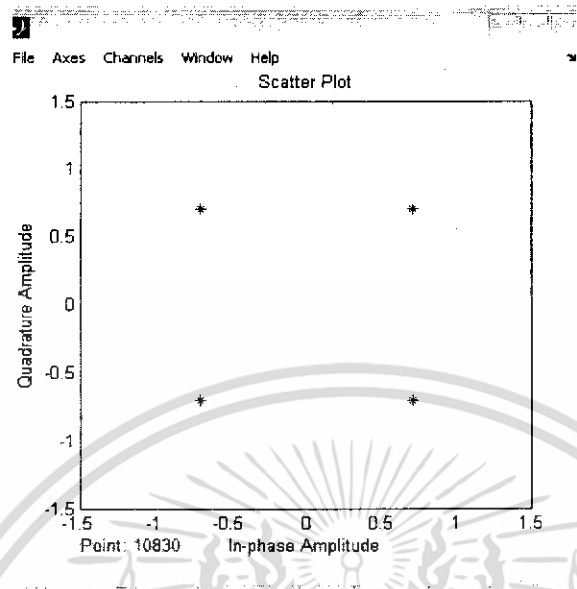
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการวิจัยการทำงานของระบบ WiMAX โดยมีบล็อกไดอะแกรมต่างๆที่ใช้ในการจำลอง หน้าที่ของแต่ละบล็อกได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

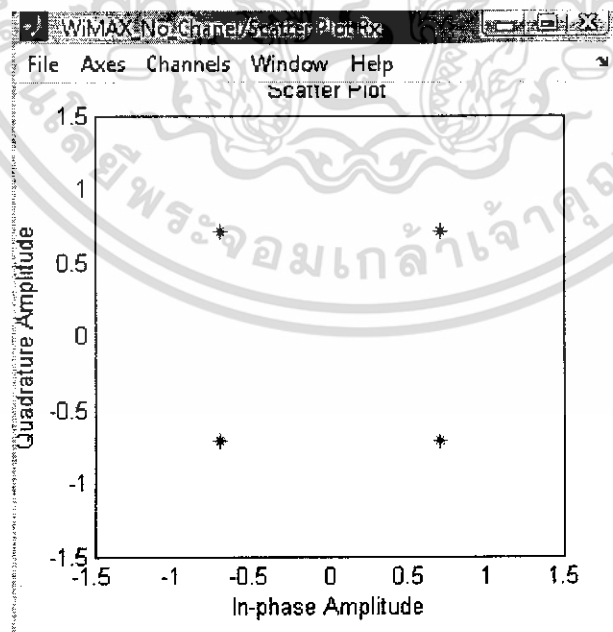
4.1.1 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบไม่มีสัญญาณรบกวนที่ความถี่

2.5 GHz



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านการมอดูเลตแบบ QPSK

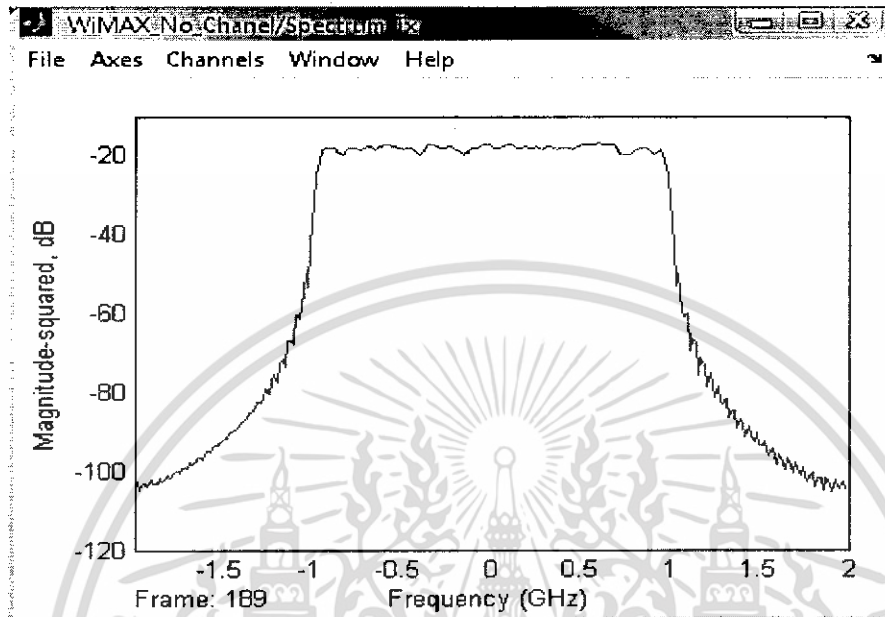
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบ QPSK ที่ความถี่ 2.5 GHz โดยสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบ QPSK จะถูกแบ่งออกเป็น 4 เฟสแต่ละเฟสห่างกัน 90 องศา โดยลักษณะของตำแหน่งของสัญญาณที่ด้านส่งจะมีลักษณะคล้ายกัน



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวน สัญญาณจะ ไม่มีการกระจายของสัญญาณเนื่องจากไม่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนทำให้ได้ รูปแบบเหมือนภาคส่งที่ส่งมา



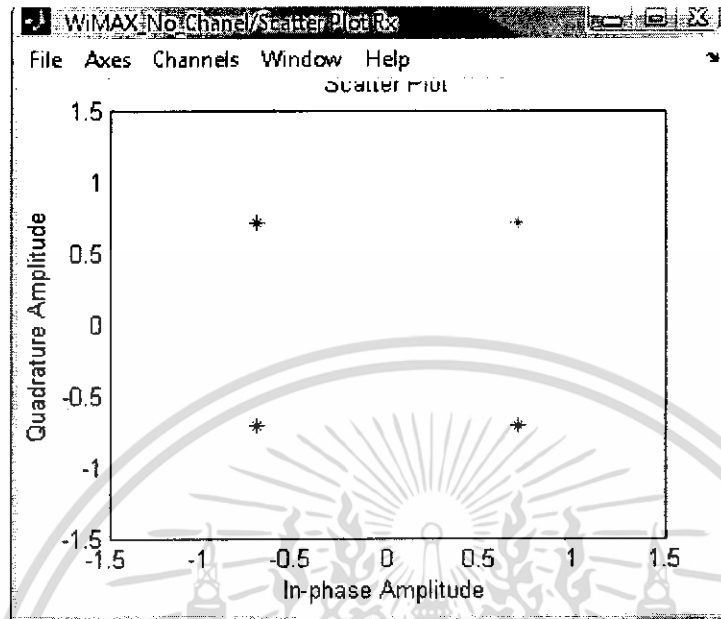
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของระบบ WiMAX แบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 2.5 GHz

รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของระบบ WiMAX ที่ไม่ผ่านช่องสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 2.5 GHz สัญญาณสเปกตรัมที่ได้จะมีความราบ โดยสเปกตรัมของระบบ WiMAX ที่ภาคส่งของทุกแบบ ที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะคล้ายกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

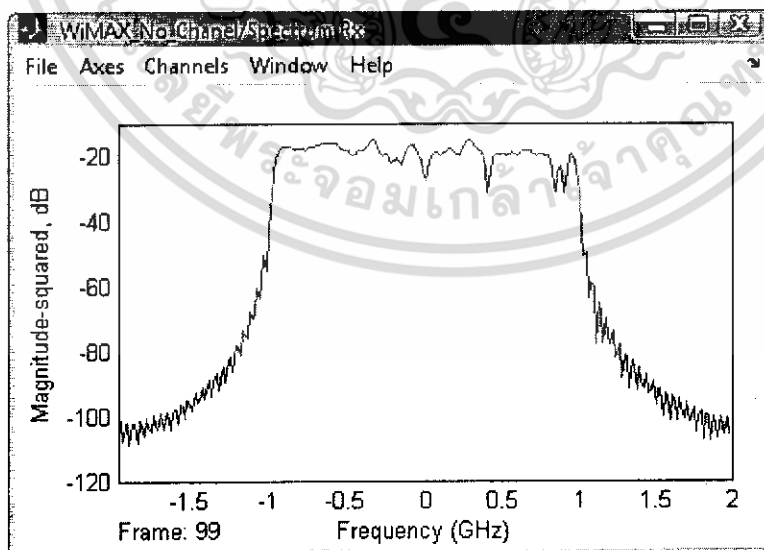
4.1.2 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบไม่มีสัญญาณรบกวนที่ความถี่

3.5 GHz



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวน 3.5 GHz

รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ไม่ผ่านสัญญาณรบกวน ที่ผ่านการมอดูเลตแบบ QPSK โดยตำแหน่งของสัญญาณจะ ไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากไม่มีสัญญาณมารบกวน



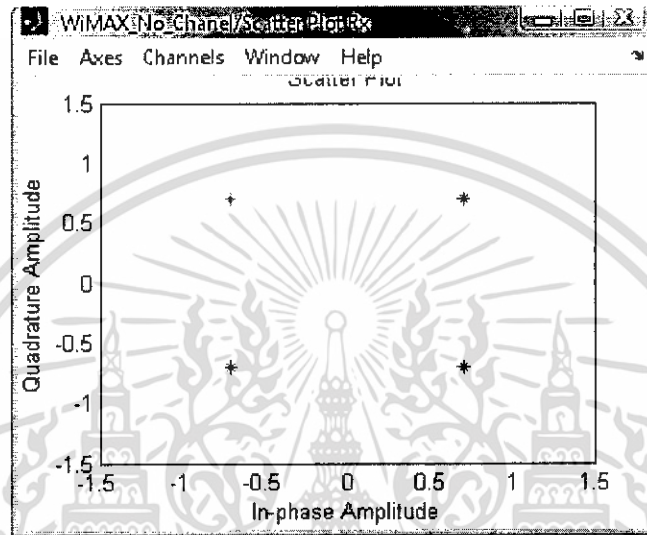
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของระบบ WiMAX แบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 3.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมทางภาครับที่ความถี่ 3.5 GHz จะมีลักษณะราบ เนื่องจากไม่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวน

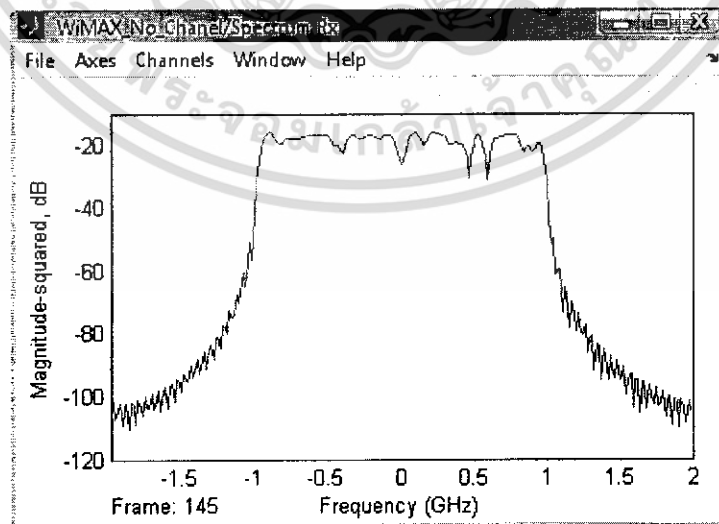
4.1.3 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบ ไม่มีสัญญาณรบกวนที่ความถี่

4.20 GHz



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ไม่มีช่องสัญญาณรบกวน 4.20 GHz

รูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ไม่มีผ่านสัญญาณรบกวน ที่ผ่านการมอดูเลตแบบ QPSK โดยตำแหน่งของสัญญาณจะไม่มีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเนื่องจากไม่มีสัญญาณรบกวน

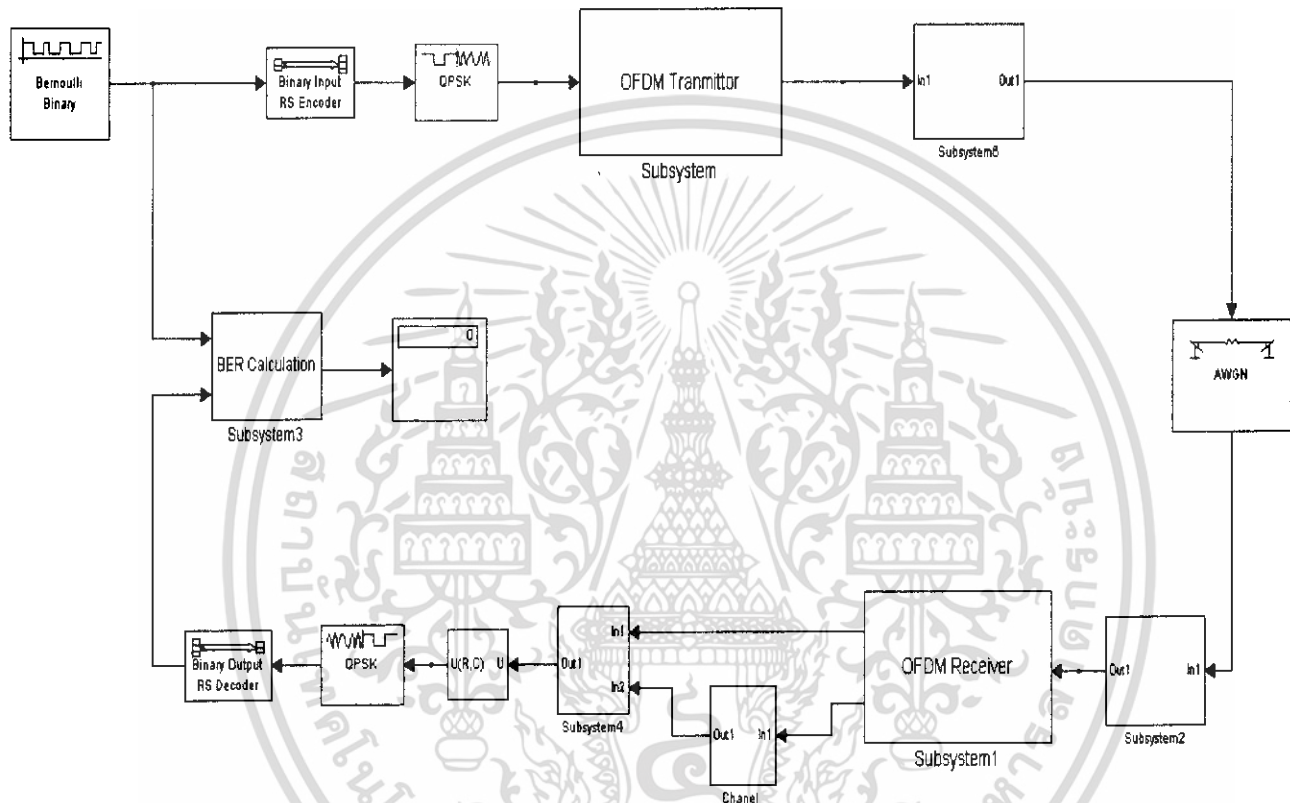


รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของระบบ WiMAX แบบไม่มีช่องสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 4.2 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมทางภาครับที่ความถี่ 4.20 GHz จะมีลักษณะราบ เนื่องจากไม่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนใดๆ มารบกวน

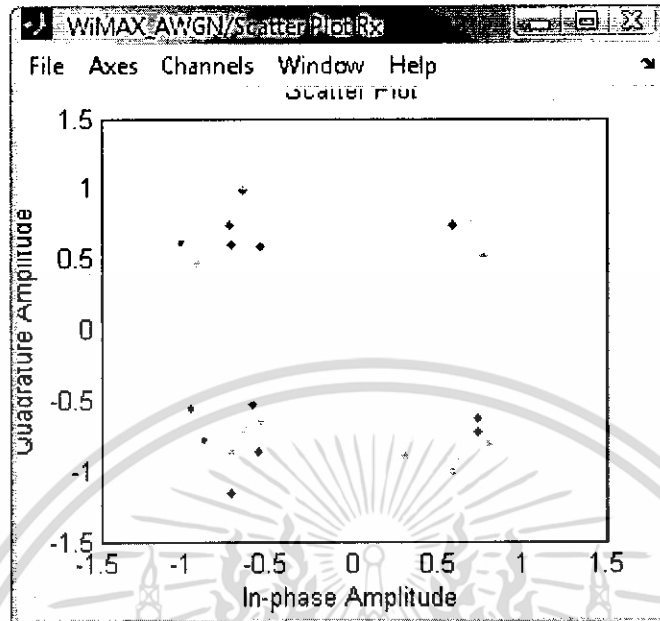
4.2 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ AWGN



รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ AWGN

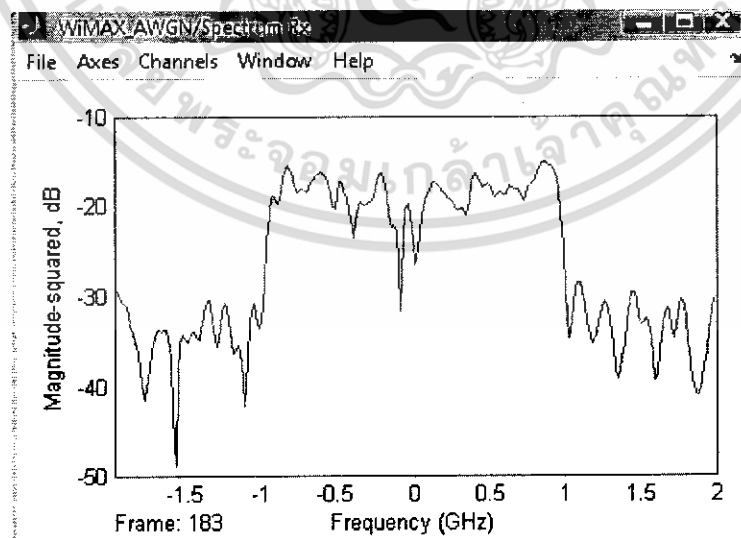
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ภาพตำแหน่งสัญญาณลึกลับและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ AWGN ที่ความถี่ 2.5 GHz



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของสัญญาณลึกลับที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งของสัญญาณลึกลับที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN จะเห็นว่าตำแหน่งของสัญญาณลึกลับมีการกระจายตัวเนื่องจากถูกสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณแบบ AWGN ทำให้สัญญาณมีลักษณะกระจายตัว

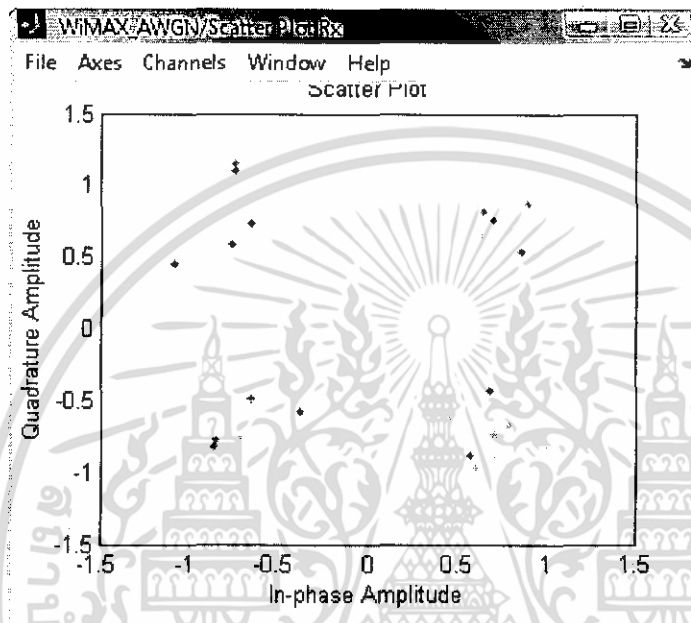


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

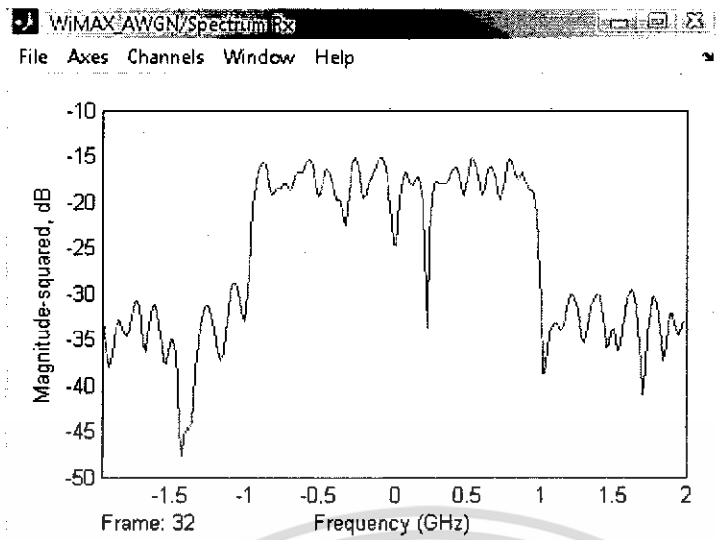
รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมของระบบ WiMAX ที่ผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งจะเห็นว่าสเปกตรัมที่ได้จะไม่ราบเรียบเนื่องจากถูกสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณแบบ AWGN

4.2.2 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ AWGN ที่ความถี่ 3.5 GHz



รูปที่ 4.12 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

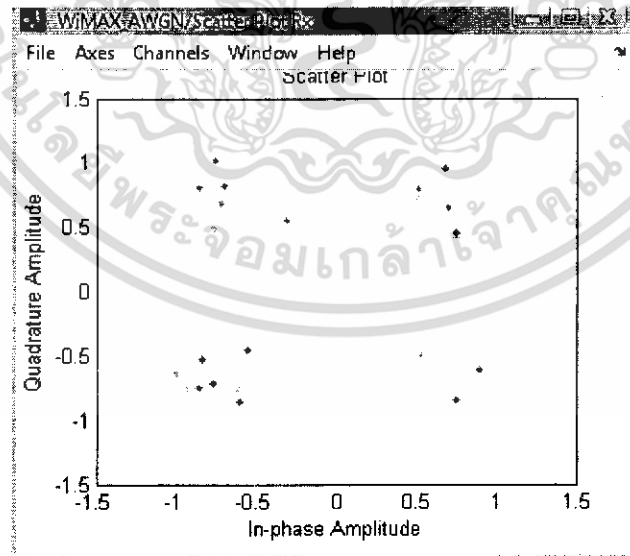
รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN จะเห็นว่าตำแหน่งของสัญญาณลักษณะมีการกระจายตัวเนื่องจากถูกสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณแบบ AWGN ทำให้สัญญาณมีลักษณะกระจายตัว



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

จากรูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของระบบ WiMAX ที่ผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งจะเห็นว่าสเปกตรัมที่ได้จะไม่ราบเรียบเนื่องจากถูกสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณแบบ AWGN

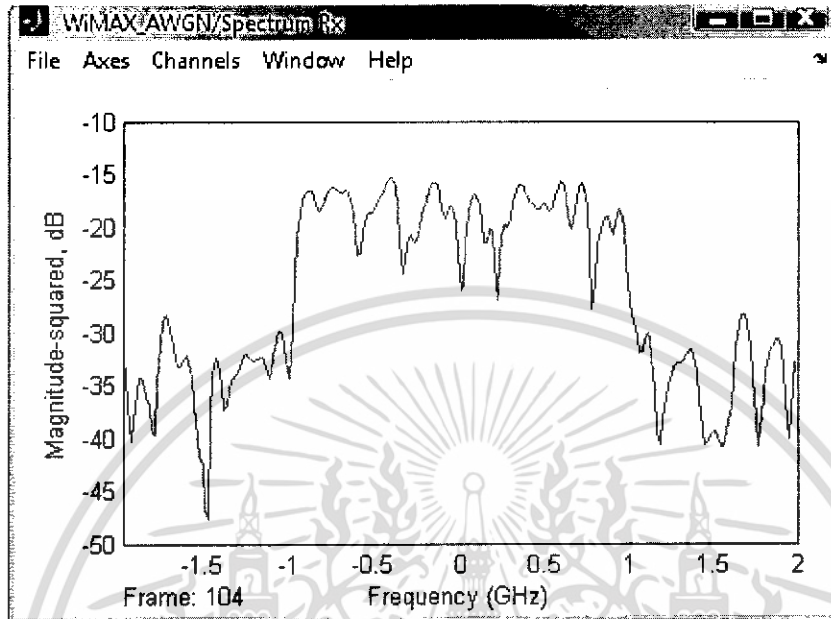
4.2.3 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ AWGN ที่ความถี่ 4.20 GHz



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

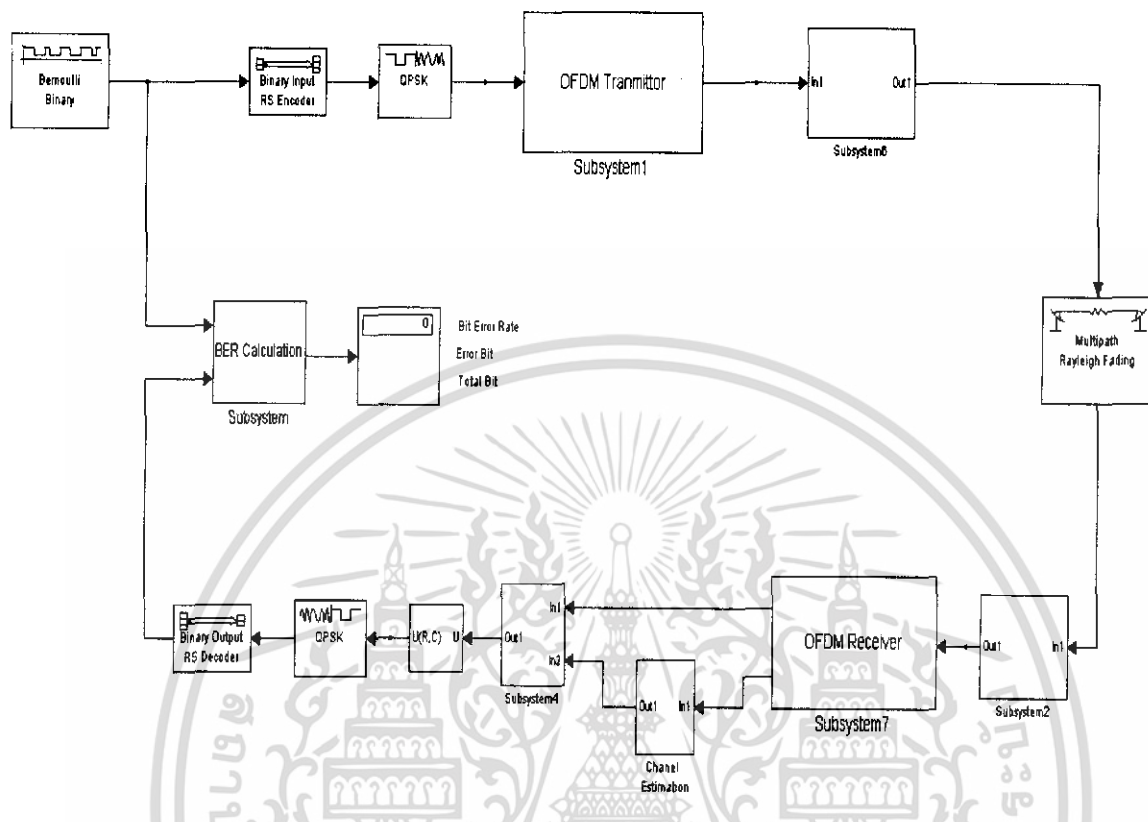
รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN จะเห็นว่าตำแหน่งของสัญญาณมีการกระจายตัวเนื่องจากถูกสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณแบบ AWGN ทำให้สัญญาณมีลักษณะกระจายตัว



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมของระบบ WiMAX ที่ผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่ความถี่ 4.20 GHz ซึ่งจะเห็นว่าสเปกตรัมที่ได้จะไม่ราบเรียบเนื่องจากถูกสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณแบบ AWGN

4.3 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading

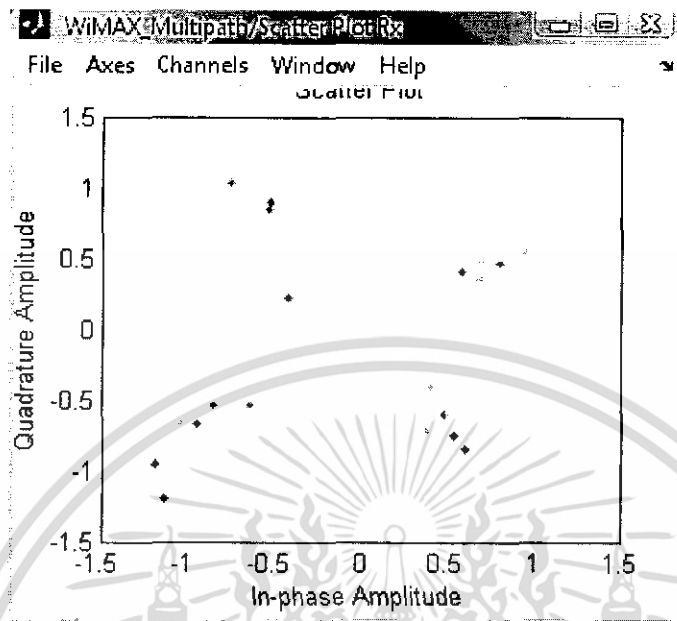


รูปที่ 4.16 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading

จากรูปที่ 4.16 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองสัญญาณ โดยใช้บล็อกไดอะแกรมแบบ แชนเนลที่มีอยู่ในโปรแกรม คือ Multi-path Rayleigh fading มาใช้เพื่อการศึกษาผลกระทบที่มีต่อสัญญาณ

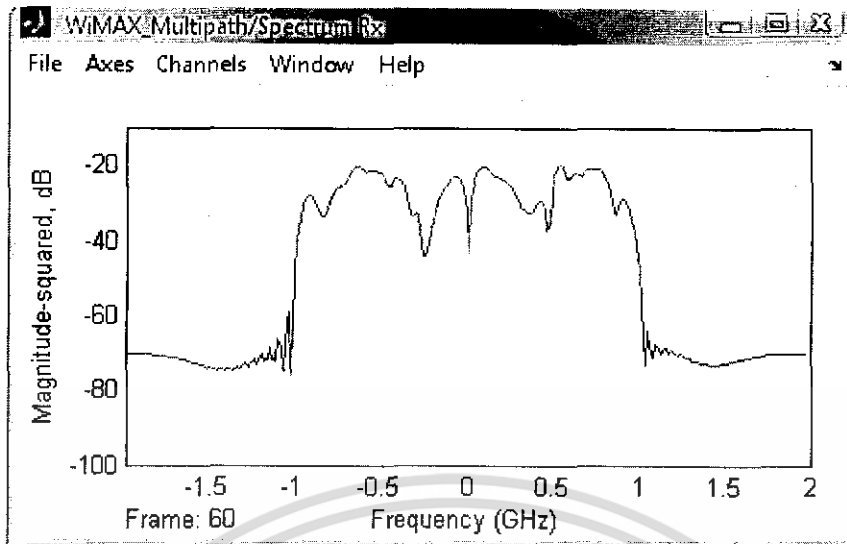
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading ที่ความถี่ 2.5 GHz



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading

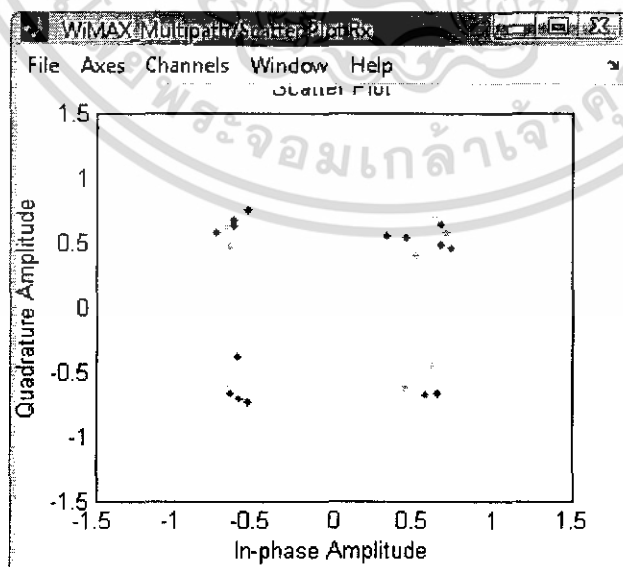
รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งของสัญญาณที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading ที่ความถี่ 2.5 GHz สัญญาณจะมีลักษณะกระจายตัว และมีการผิดเฟสของสัญญาณ เนื่องจากการเดินทางหลายเส้นทาง (Multi-path) ของสัญญาณทำให้เกิดการตีเลี้ยวที่ภาครับทำให้สัญญาณที่รับมามีการผิดเฟสเกิดขึ้น



รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading

รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมของระบบ WiMAX ซึ่งสัญญาณสเปกตรัมที่ได้จะไม่ราบเรียบ เนื่องจากการเค็มทางหลายทิศทาง (Multi-path) ของสัญญาณทำให้เกิด Doppler shift ทางด้านข้างทั้งสองข้างของสเปกตรัม

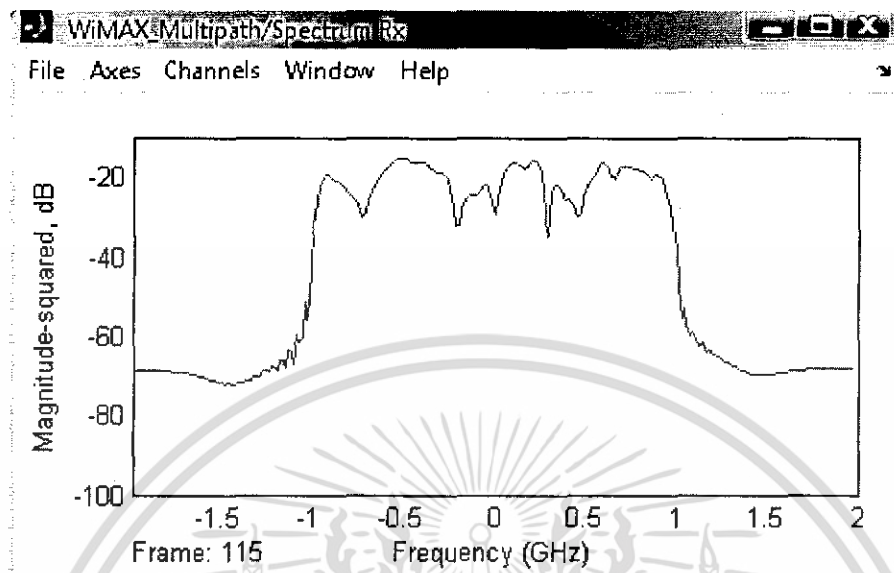
4.3.2 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading ที่ความถี่ 3.5 GHz



รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ผ่านสัญญาณรบกวน สังเกตได้จากรูปว่า จะมีการกระจายของสัญลักษณ์ในการส่งทำให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาดของข้อมูลเกิดขึ้น

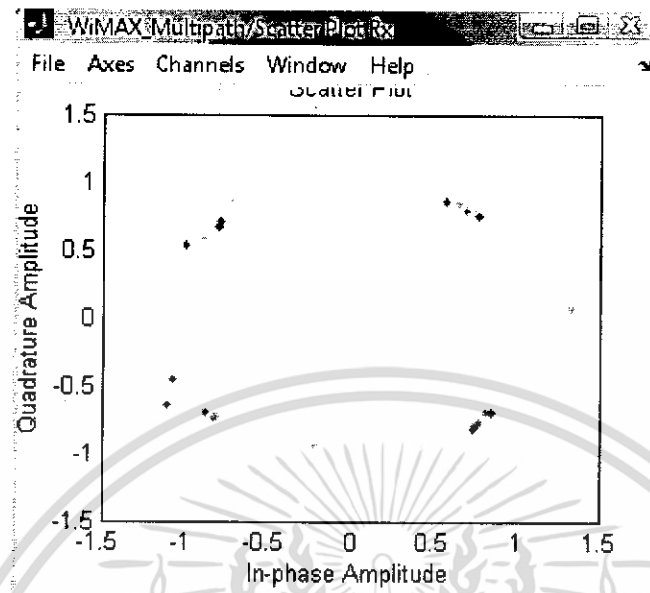


รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading

รูปที่ 4.20 แสดงสเปกตรัมของระบบ WiMAX ซึ่งสัญญาณสเปกตรัมที่ได้จะไม่ราบเรียบ เนื่องจากการเดินทางหลายทิศทาง (Multi-path) ของสัญญาณทำให้เกิด Doppler shift ทางด้านข้างทั้งสองข้างของสเปกตรัม

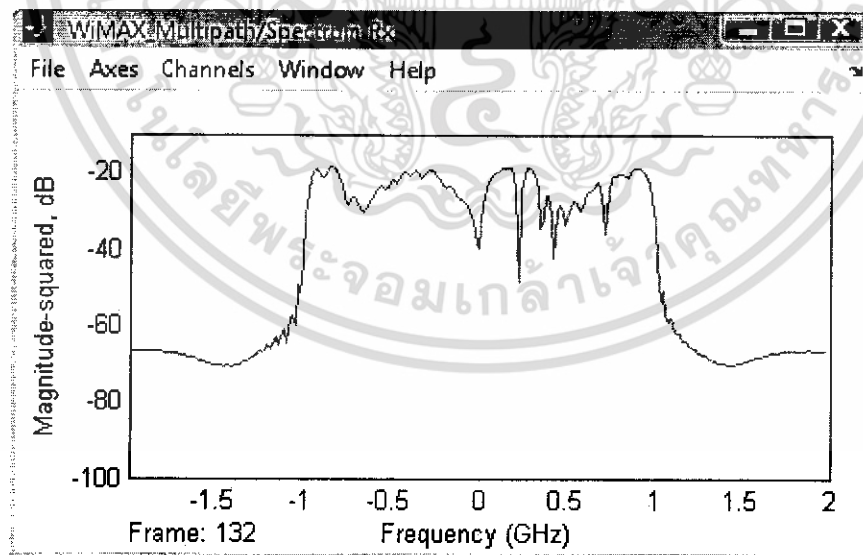
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading ที่ความถี่ 4.20 GHz



รูปที่ 4.21 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading

รูปที่ 4.21 แสดงตำแหน่งของสัญญาณลักษณะ มีการกระจายของสัญญาณข้าม ไปอยู่ที่เฟสอื่นเกิดความผิดพลาดของข้อมูลเกิดขึ้น

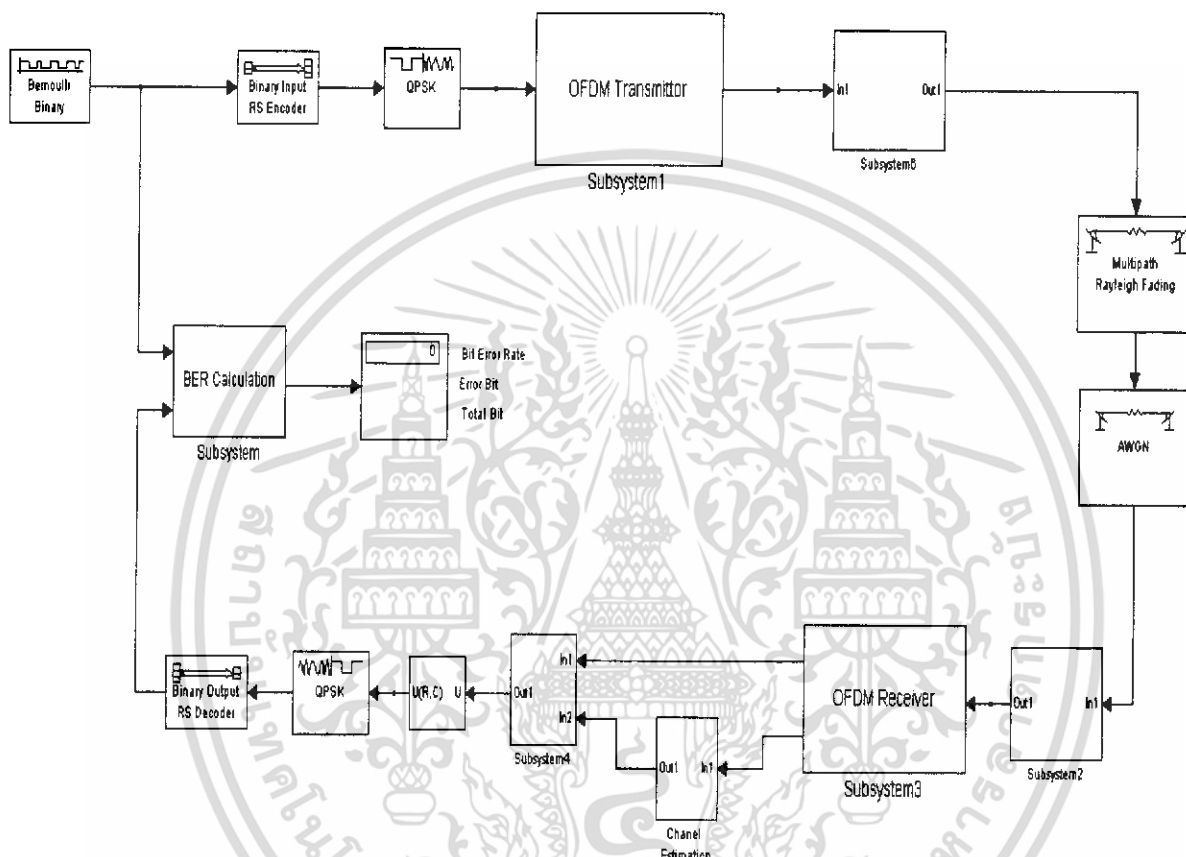


รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่มีการรบกวนของสัญญาณจากการประวิงเวลาของสัญญาณที่ส่ง และการ Doppler shift

4.4 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading แบบช่องสัญญาณแบบ AWGN

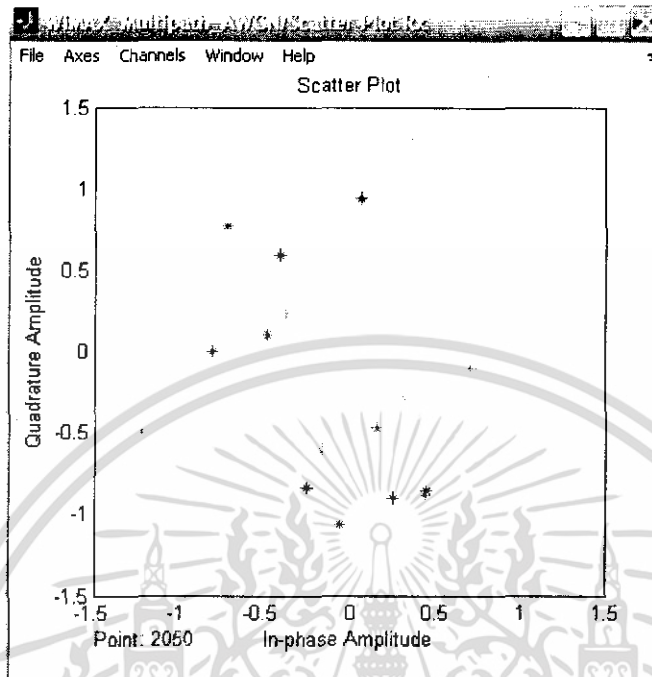


รูปที่ 4.23 บล็อกไดอะแกรมระบบ WiMAX แบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN

จากรูปที่ 4.23 แสดงบล็อกไดอะแกรมการจำลองสัญญาณของระบบ WiMAX ที่ผ่านสัญญาณรบกวนทั้งสองแบบ โดยการนำเอาบล็อกไดอะแกรมที่เป็นสัญญาณรบกวนที่ได้นำมาใช้ก่อนหน้านี้นี้มาต่อรวมกัน

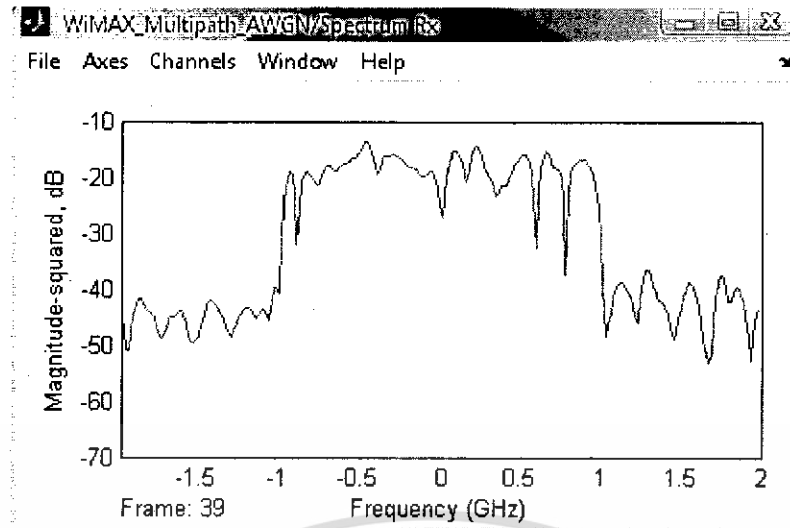
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN ที่ความถี่ 2.5 GHz



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และ AWGN

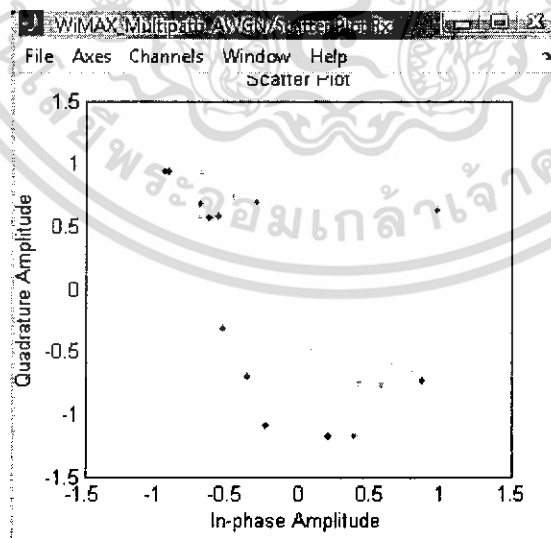
รูปที่ 4.24 แสดงสัญญาณที่ผ่านสัญญาณรบกวนที่นำมาวมกัน สังเกตได้ว่าเกิดการกระจายของข้อมูลไปในทุกทิศทาง อันเนื่องมาจากการรบกวนของระบบ การประวิงเวลาของการส่งข้อมูล



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN

จากรูปที่ 4.25 แสดงสเปกตรัมของระบบที่ผ่านการรบกวนทั้งสองแบบ สังเกตเห็นได้ว่าสเปกตรัมเกิดการรบกวนอย่างมาก เกิดการรบกวนของระบบ การประวิงเวลา การ Doppler shift ทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลมากขึ้น

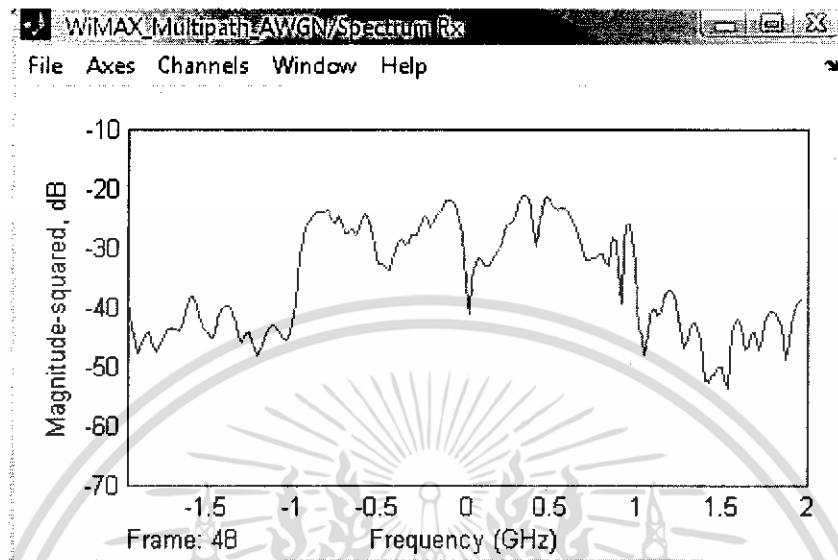
4.4.2 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN ที่ความถี่ 3.5 GHz



รูปที่ 4.26 ตำแหน่งของสัญญาณที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

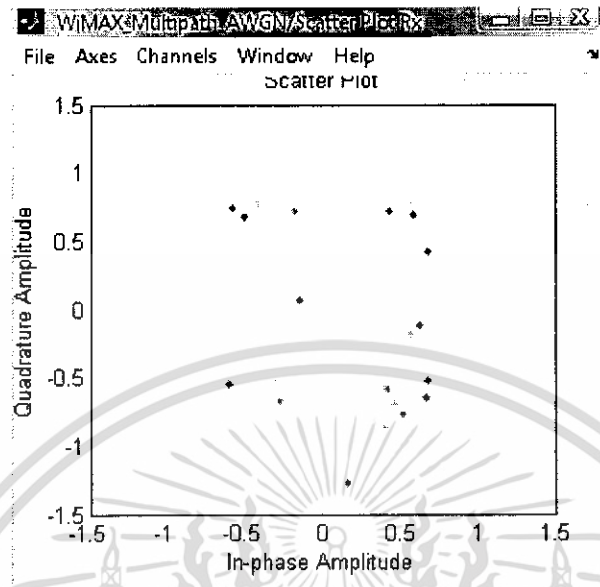
จากรูปที่ 4.26 แสดงสัญลักษณ์ที่ผ่านสัญญาณรบกวนที่นำมารวมกัน สังเกตได้ว่าเกิดการกระจายของข้อมูลไปในทุกทิศทาง อันเนื่องมาจากการรบกวนของระบบ การประวิงเวลาของการส่งข้อมูลแสดงตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ผ่านการรบกวนทั้งสองแบบ



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN

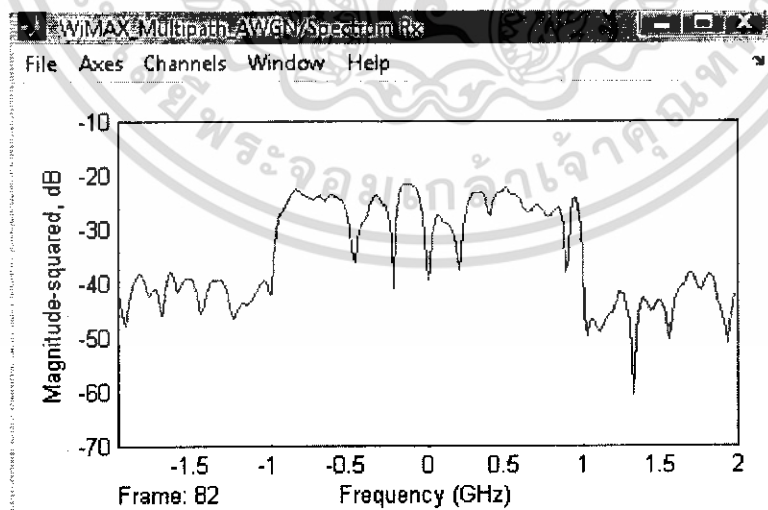
จากรูปที่ 4.27 แสดงสเปกตรัมของระบบที่ผ่านการรบกวนทั้งสองแบบ สังเกตเห็นได้ว่าสเปกตรัมเกิดการรบกวนอย่างมาก เกิดการรบกวนของระบบ การประวิงเวลา การ Doppler shift ทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลมากขึ้น

4.4.3 ภาพตำแหน่งสัญญาณลักษณะและสเปกตรัมแบบช่องสัญญาณ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN ที่ความถี่ 4.20 GHz



รูปที่ 4.28 ตำแหน่งของสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN

จากรูปที่ 4.28 แสดงสัญญาณลักษณะที่ผ่านสัญญาณรบกวนที่นำมารวมกัน สังเกตได้ว่าเกิดการกระจายของข้อมูลไปในทุกทิศทาง อันเนื่องมาจากการสัญญาณรบกวนของระบบ การประวิงเวลาของการส่งข้อมูลแสดงตำแหน่งของสัญญาณที่ผ่านการรบกวนทั้งสองแบบ



รูปที่ 4.29 สเปกตรัมของระบบ WiMAX ทางด้านรับหลังผ่านสัญญาณรบกวนแบบ Multi-path Rayleigh Fading และช่องสัญญาณแบบ AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 แสดงสเปกตรัมของระบบที่ผ่านการรบกวนทั้งสองแบบ สังเกตเห็นได้ว่าสเปกตรัมเกิดการรบกวนอย่างมาก เกิดการรบกวนของระบบ การประวิงเวลา การ Doppler shift ทำให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลมากขึ้น

ตารางค่าอัตราความผิดพลาดต่อบิต

โดยในการทดลองได้กำหนดการเปลี่ยนค่า Signal to Noise Ratio ตั้งแต่ 0-10 (db) เดซิเบล เพื่อวัดค่าอัตราผิดพลาดต่อบิต (BER) โดยทำการพิจารณาที่ระบบ WiMAX ที่ช่องสัญญาณแบบ AWGN และช่องสัญญาณ AWGN ต่อรวมอยู่กลับช่องสัญญาณแบบ Multi-path Rayleigh Fading ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราผิดพลาดต่อบิต(BER) ที่ค่า SNR ตั้งแต่ 0-10 เดซิเบล

SNR (dB)	BER (Multi-path and AWGN)	BER (AWGN)
0	0.4195	0.2261
1	0.3741	0.2263
2	0.3462	0.1528
3	0.286	0.0918
4	0.2427	0.02708
5	0.214	0.01161
6	0.1431	0.001089
7	0.1184	0.0001799
8	0.0899	7.992e-6
9	0.07576	7.085e-7
10	0.05844	7.35e-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

1. สรุปผล

จากการจำลองระบบการสื่อสารไร้สาย WiMAX โดยใช้โปรแกรมเมทเล็ปจะได้ค่าอัตราการสูญเสียต่อบิต และค่าสเปกตรัมของระบบโดยค่าอัตราการสูญเสียต่อบิตยังมีค่าสูงอยู่ อาจเป็นเพราะ แบบจำลองยังไม่สมบูรณ์ 100 % และการปรับค่าพารามิเตอร์ภายในบล็อกโคเดอเรมบ้างค่าอาจยังไม่สัมพันธ์กันจึง ทำให้เกิดค่าอัตราการสูญเสียต่อบิตยังคงมีอยู่

2. ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน

เนื่องจากการสื่อสารไร้สาย WiMAX เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบใหม่ทำให้มีข้อมูลให้ศึกษาอย่างไม่เพียงพอ และข้อมูลส่วนใหญ่ยังเป็นภาษาอังกฤษจึงต้องใช้เวลาในการศึกษาเป็นเวลานาน และยังไม่มีการทำวิจัยเกี่ยวกับเรื่องการสื่อสารไร้สาย WiMAX โดยใช้โปรแกรมซิมูเลชัน จึงเป็นอุปสรรคในการหาแบบจำลองเพื่อมาอ้างอิงในการทดลอง

3. แนวทางในการพัฒนาต่อ

สามารถนำแบบจำลองนี้ไปพัฒนาต่อได้โดยต้องศึกษาถึงรายละเอียดของระบบการสื่อสารไร้สาย WiMAX และ โปรแกรมซิมูเลชัน ให้เข้าใจเสียก่อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] T.S. Rappaport. **Wireless Communication: Principles and Practice**. Prentice Hall. 1996
- [2] **Orthogonal Frequency Division Multiplexing**. U.S. Patent No. 3, November 14, 1966. issued Jan. 6, 1970
- [3] R.V.Nee, R. Prasad. **OFDM for Wireless Multimedia Communications**. Artech House. 2000.
- [4] S. Jindal., A. Jindal and N. Gupta. "Grouping WI-MAX, 3G and WI-FI for Wireless Broadband"
- [5] A. Ghosh and D. R. Wolter. "Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential." SBC Laboratories Inc.
- [6] R. Calderbank., S. Das., N. Al-Dhahir and S. Diggavi. "A Novel Full-Rate Full-Diversity STBC with Application to WiMAX"
- [7] Vinod Patmanathan. "Simulation and DSP Board Implementation of an Optical Transmission System using OFDM" (2004)
- [8] W. Zhibin., L. Yan and J. Xiangpeng. "Channel Estimation in OFDM Systems".
- [9] ณรงค์พล ขอวิทยา (2546), การปรับปรุงสมรรถนะของระบบ OFDM โดยอาศัยโคเวอริจันตี ที่ด้านส่งร่วมกับการเข้ารหัสบล็อกแบบสเปซ-ไทม์, วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง