

ผลกระทบของช่องส่งสัญญาณแบบมัลติพาร์ทเฟดดิ้งที่กล้ำสัญญาณแบบ BPSK

EFFECTS OF MULTIPATH FADING CHANNEL ON BPSK SIGNAL

นายพิมุกต์ อุปถัมภ์ รหัส 50361842

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่รับ..... 19 มิ.ย. 2555

เลขทะเบียน..... 15736341

เลขเรียกหนังสือ..... 2/5

มหาวิทยาลัยนเรศวร ๗๖๒๙ ๗/ ๒๕๕๓

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

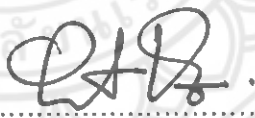
ปีการศึกษา ๒๕๕๓

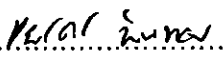


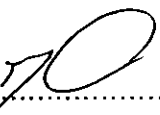
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลกระทบของช่องส่งสัญญาณแบบมัลติพาร์ทเฟลคดิงที่กล้าสัญญาณแบบ BPSK
ผู้ดำเนินโครงการ นายพินุกต์ อุปถัมภ์ รหัส 50361842
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


..... ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)


..... กรรมการ
(ดร.ชัชวรัตน์ พินทอง)


..... กรรมการ
(ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลกระทบของช่องส่งสัญญาณแบบมัลติพาร์ทเฟดดิ้งที่กล้าสัญญาณแบบ BPSK
ผู้ดำเนินโครงการ นายพินุกต์ อุปถัมภ์ รหัส 50361842
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2553

.....

บทคัดย่อ

การสื่อสารข้อมูลโดยอาศัยช่องส่งสัญญาณที่เป็นอากาศ ย่อมมีผลกระทบจากการลดทอนของสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นตามสภาพแวดล้อม แต่ในความเป็นจริงสภาพแวดล้อมไม่ได้เป็นที่เปิดโล่งเสมอไป มักจะมีสิ่งกีดขวางต่างๆมากมายที่กีดขวางทางเดินของสัญญาณ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณและมีผลให้ข้อมูลที่ได้รับมีความผิดพลาด ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดในการส่งข้อมูล จึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเรื่องของช่องส่งสัญญาณแบบ Multipath และการเข้ารหัส-ถอดรหัส เพื่อให้สามารถแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาดมีความถูกต้องให้ได้มากที่สุด

โครงการนี้เป็นการทดลองการสร้างแบบจำลองของช่องส่งสัญญาณแบบ Multipath fading โดยอาศัยทฤษฎีของเรเลย์ โดยการเพิ่มในส่วนของการเข้ารหัส-ถอดรหัส แบบ Convolution Code และการประยุกต์ใช้อินเทอร์ลิฟด้วยโปรแกรม MATLAB สุดท้ายผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของช่องส่งสัญญาณในกรณีต่างๆ

Project title	Effects of Multipath Fading Channel on BPSK Signal	
Name	Mr. Pimuk Uppathum	ID. 50361842
Project advisor	Assistant Professor Surachet Kanprachar, Ph.D.	
Major	Electrical Engineering	
Department	Electrical and Computer Engineering	
Academic year	2010	

.....

Abstract

Communication channel transmitting data through the air is usually affected by signal attenuation and noise with respect to the environment. The environment often has many obstacles that obstruct the path of the channel. Those effects in signal interference will lead to data errors; hence, the reduction of the error is to study on multipath channel and encoding-decoding which have been undertaken to fix data errors and to provide information as accurately as possible.

This project is an experimental model of a transmission in multipath fading channel. The project will use the theory of Rayleigh by adding to the encoding-decoding a Convolution Code and application of interleave with MATLAB program. Finally, the performance of channel in various cases is analyzed.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จล่วงได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายๆท่านด้วยกัน ซึ่งผู้เขียนขอขอบพระคุณดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำโครงการในเรื่องของข้อมูลและการเขียนโปรแกรม และขอเวลาให้คำแนะนำทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.ชัยรัตน์ พินทอง และ ดร.อักรพันธ์ วงศ์กังแห ที่ให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบในเรื่องการทำโครงการ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนให้ผู้จัดทำเป็นคนที่ดีของสังคม

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ แนะนำ ให้กำลังใจ และคำปรึกษาที่ดีในการทำโครงการนี้จนสำเร็จล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอกราบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ให้กำเนิด และให้ผู้จัดทำมีวันนี้
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจาก โครงการนี้ ทางผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

นายพิมุกต์ อุปถัมภ์

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	2
1.4 แผนดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดงบประมาณ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการส่งสัญญาณ.....	5
2.2 Multipath Fading in Rayleigh Channel.....	11
2.2.1 Fading และ Multipath ในช่องส่งสัญญาณคืออะไร.....	11
2.2.2 ความน่าจะเป็นและทฤษฎีของเรเลย์.....	13
2.2.2.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	13
2.2.2.2 ตัวแปรทางสถิติ.....	15
2.2.2.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน.....	17
2.2.2.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเรเลย์.....	18
2.2.3 ผลกระทบของช่องส่งสัญญาณ.....	21
2.2.3.1 การลดทอนของสัญญาณ.....	21
2.2.3.2 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3.3 การหน่วงเวลาที่เกิดจากสิ่งกีดขวางโดยอาศัยทฤษฎีของเรเลย์.....	22
2.3 การทดสอบค่าอัตราความผิดพลาด (Bit error rate).....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	26
3.1 การออกแบบโปรแกรม.....	26
3.1.1 การสร้างสัญญาณข้อมูล.....	26
3.1.2 การเข้ารหัสสัญญาณแบบ Convolution code และ Interleaf	26
3.1.3 การกล้ำสัญญาณ (Modulation).....	27
3.1.4 ช่องส่งสัญญาณ (Channel).....	28
3.1.4.1 Noise	28
3.1.4.2 การลดทอน (Attenuation).....	30
3.1.4.3 เวลาหน่วง (Time Delay).....	31
3.1.5 การ Demodulation	32
3.1.6 การถอดรหัสสัญญาณแบบ Convolution code และ interleaf.....	34
3.1.7 การหาอัตราความผิดพลาด (Bit error rate, BER)....	34
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	38
3.2.1 การวิเคราะห์เรื่องของเส้นทาง (Path).....	38
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการ.....	40
4.1 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง.....	40
4.2 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง.....	47
4.3 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 3 เส้นทาง.....	53
4.4 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.1 ผลการดำเนินโครงการ.....	63
5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินโครงการ.....	65
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	66
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	67



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นในทิศทางต่างๆ เนื่องจากสิ่งกีดขวาง.....	2
2.1 แสดงลำดับการส่ง-รับของสัญญาณดิจิทัล.....	5
2.2 ตัวอย่าง Line Coding ทั้ง 3 ชนิด.....	7
2.3 วิธีการทำอินเทอร์ลีฟ.....	8
2.4 แสดงการสร้างสัญญาณ BPSK จากสัญญาณ NRZ โดยใช้ความถี่ 4 เฮิร์ตในการกล้ำสัญญาณ..	10
2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของสัญญาณจากสถานีส่งถึงสถานีรับ.....	11
2.6 แสดงถึงการลดทอนและเวลาหน่วงซึ่งเกิดจากช่องส่งสัญญาณ.....	12
2.7 ตัวอย่างกราฟ CDF	14
2.8 ตัวอย่างของ PDF	15
2.9 แสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม 2 ชุด.....	16
2.10 แสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน.....	18
2.11 แสดงพิกัดของแกนของสมการที่ 2.16.....	19
2.12 แสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเรเลย์	20
2.13 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน.....	22
2.14 เปรียบเทียบค่า BER ในการกล้ำสัญญาณที่แตกต่างกัน.....	23
3.1 แสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการของข้อมูล.....	25
3.2 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบยูนิฟอร์ม.....	26
3.3 กระบวนการ Line coding แบบ NRZ.....	27
3.4 กระบวนการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK.....	27
3.5 แสดงข้อแตกต่างของสัญญาณรบกวนในค่าความแปรปรวน ต่างๆ.....	29
3.6 แสดงการลดทอนในความถี่ต่างๆ.....	30
3.7 รูปแบบการส่งสัญญาณที่ถูกกำหนดพารามิเตอร์ไว้แล้ว.....	31
3.8 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเรเลย์	31
3.9 แสดงถึงช่วงเวลาที่คลื่นเดินทางเทียบกับการลดทอนที่ความถี่ 800 เมกะเฮิร์ต.....	32
3.10 แผนภาพการ demodulation ของสัญญาณ BPSK	32
3.11 แสดงการ Demodulation ของสัญญาณ BPSK.....	33
3.12 แสดงขั้นตอนการหา BER	34
3.13 แสดงขั้นตอนลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงขั้นตอนการทำงานส่วนของ Process.....	37
3.15 แสดงเส้นทางของคลื่นสัญญาณในทิศทางต่างๆ.....	38
4.1 แสดงเส้นทางของคลื่น.....	40
4.2 แสดงลำดับขั้นตอนในการทดลอง	41
4.3 ตัวอย่างสัญญาณ BPSK ที่ผ่านช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง	42
4.4 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอนแบบ 1 เส้นทาง	43
4.5 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 1 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่	44
4.6 แสดงสัญญาณ BPSK ก่อนผ่านช่องส่งสัญญาณและสัญญาณหลังจากผ่านช่องส่งสัญญาณ....	45
4.7 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง.....	46
4.8 ตัวอย่างสัญญาณที่ ผ่านช่องส่งสัญญาณและแสดงการรวมกันของสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง...47	
4.9 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอน แบบ 2 เส้นทาง.....	48
4.10 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 2 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่.....	49
4.11 แสดงสัญญาณทางความถี่ที่ถูกส่งผ่านช่องส่งสัญญาณ.....	51
4.12 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง (ก่อนเข้ารหัส)	52
4.13 ตัวอย่างสัญญาณที่ ผ่านช่องส่งสัญญาณและแสดงการรวมกันของสัญญาณแบบ 3 เส้นทาง..53	
4.14 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอนแบบ 3 เส้นทาง.....	54
4.15 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 3 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่.....	55
4.16 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 3 เส้นทาง (ก่อนเข้ารหัส).....	56
4.17 ตัวอย่างสัญญาณที่ ผ่านช่องส่งสัญญาณและแสดงการรวมกันของสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง..57	
4.18 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอนแบบ 4 เส้นทาง.....	58
4.19 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 4 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่.....	59
4.20 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง (ก่อนเข้ารหัส).....	60
4.21 ประกอบการอธิบายสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง.....	61
5.1 ช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง.....	63
5.2 เปรียบเทียบช่องส่งสัญญาณที่เกิดเวลาหน่วงที่แตกต่างกัน.....	64

บทที่ 1

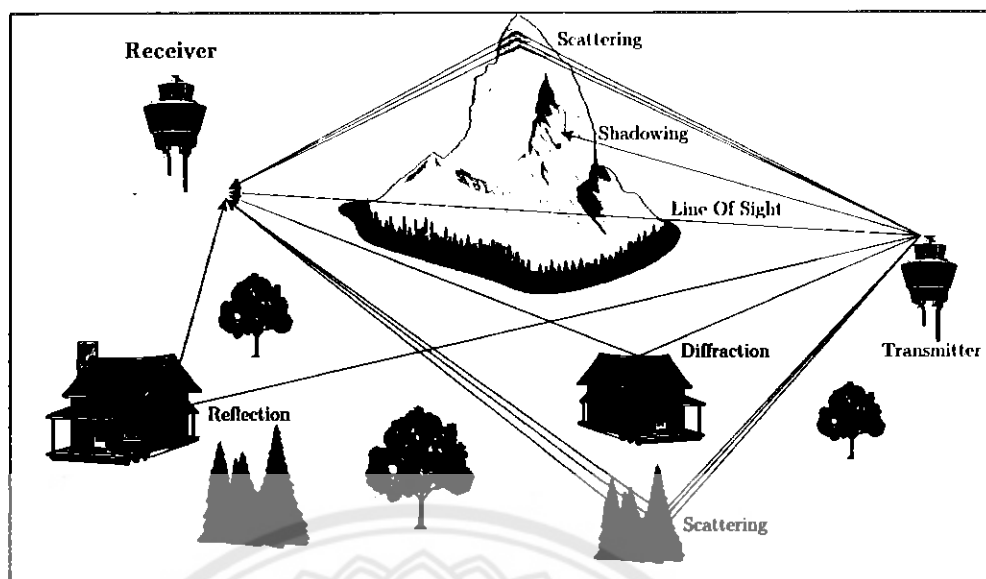
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ทุกวันนี้การสื่อสารข้อมูลมีหลายประเภท ซึ่งในปัจจุบันที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ระบบแลน (LANs) เป็นการสื่อสารข้อมูลที่ใช้งานง่ายและสะดวกกับการใช้ตามบ้านเรือน อาคารที่ทำงานทั่วไป เป็นต้น เส้นใยแก้วนำแสง (Optical fiber) เป็นการสื่อสารที่มีความเร็วสูง และสามารถส่งข้อมูลได้ไกลข้ามทวีปหรือมหาสมุทร แต่การสื่อสารเหล่านี้ต่างมีข้อจำกัดมากมาย เช่น ค่าใช้จ่ายในการวางสายในระยะไกล ค่าบำรุงรักษาเพราะมีความเสี่ยงต่อการถูกทำให้เสียหายได้ง่าย จึงทำให้การสื่อสารไร้สายเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทนการสื่อสารข้างต้นได้ การสื่อสารไร้สายที่คุ้นเคยกันดี อาทิเช่น โทรศัพท์มือถือ บลูทูธ ไวเลส เป็นต้น การสื่อสารลักษณะนี้มีข้อดีคือ ง่ายต่อการใช้งาน ยืดหยุ่น และสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่สูง

ไม่ใช่จะมีเพียงแต่ข้อดีเท่านั้นสำหรับการสื่อสารไร้สาย ปัญหาสำคัญที่เป็นอุปสรรคของการสื่อสารไร้สายคือ สิ่งแวดล้อมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ต้นไม้ ภูมิประเทศที่เป็นภูเขา ล้วนเป็นสิ่งกีดขวางทางเดินของสัญญาณที่ส่งไปทั้งสิ้น ผลลัพธ์ คือ สัญญาณที่ถูกส่งไปจะเดินทางไปชนกับสิ่งกีดขวางต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ส่งผลให้สัญญาณเกิดการสะท้อน เลี้ยวเบนและกระเจิงไปยังทิศต่างๆ พอถึงสถานีรับสัญญาณ สัญญาณที่มาถึงจะเกิดการอ่อนกำลังลงของสัญญาณ (Fading) และแต่ละเส้นทางจะเกิดความล่าช้า (Delay) เนื่องจากเวลาที่มาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ผลของการลดทอนและการล่าช้าของคลื่นที่เดินทางเนื่องมาจากสิ่งกีดขวางมาเรียกว่า Multipath Fading

เรื่องของ Multipath Fading ในปกติแล้วจะพบได้ในโทรศัพท์มือถือ เพราะว่าการส่งสัญญาณจากสถานีส่งไปถึงตัวรับ (โทรศัพท์ของเรา) ต้องผ่านสิ่งกีดขวางมากมายดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น และถ้าในกรณีที่มีการวิเคราะห์ว่า ตัวรับไม่อยู่กับที่และมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะมีผลความละเอียดและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื้อหาและทฤษฎีที่สนับสนุนและเกี่ยวข้อง อาทิเช่น Nakagami fading, Weibull fading, Rayleigh fading, Rician fading เป็นต้น ซึ่งแต่ละทฤษฎีก็จะมีลักษณะการศึกษาและนำมาใช้ที่เฉพาะเจาะจงแตกต่างกันตัวอย่างเช่น Rician fading จะเน้นการอ่อนกำลังของสัญญาณที่มีผลของเส้นสายตา (Line of sight) มาเกี่ยวข้องด้วยเป็นต้น แต่ทว่าปริยฐานิพนธ์นี้จะเน้นศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีของ Rayleigh fading ซึ่งเป็นการศึกษาผลกระทบของการอ่อนกำลังสัญญาณในบางย่านความถี่ที่เกิดมาจากสิ่งกีดขวางทางเดินคลื่น (Multipath fading effect) ซึ่งได้ละการพิจารณาเรื่องการเคลื่อนที่ของสถานีรับ-ส่ง



รูปที่ 1.1 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นในทิศทางต่างๆ เนื่องจากสิ่งกีดขวาง [1]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาเรื่องการอ่อนกำลังของสัญญาณเนื่องมาจากสิ่งกีดขวาง (Multipath fading Channel) โดยอาศัยทฤษฎีของ Rayleigh-fading
2. ศึกษาและสร้างแบบจำลองของช่องส่งสัญญาณแบบ Rayleigh-fading โดยอ้างอิงสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian Noise) โดยอาศัยโปรแกรมแมทแล็บ
3. เปรียบเทียบความแตกต่างและประสิทธิภาพการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK ในช่องส่งสัญญาณแบบ multipath โดยอาศัยทฤษฎีของ Rayleigh กับช่องสัญญาณที่ไม่มีผลของ multipath มาเกี่ยวข้อง
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK ในช่องส่งสัญญาณที่มีการเพิ่มการเข้ารหัสแบบ Convolution Code และการประยุกต์ใช้ Interleaf

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับช่องส่งสัญญาณแบบ Multipath Fading ที่อ้างอิงทฤษฎี Rayleigh และอาศัยการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK
2. ศึกษาช่องส่งสัญญาณแบบ Multipath Fading ที่มีผลรบกวนแบบเกาส์เซียน
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดเมื่อเพิ่มการเข้ารหัสแบบ Convolution Code และ Interleaf โดยอาศัยการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมแมทแล็บเพื่อใช้ในการทำการทดลอง

1.4 แผนดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนิน โครงการ	ปีการศึกษา 2553							ปีการศึกษา 2554		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. รวบรวมข้อมูลและศึกษาข้อมูล	↔									
2. ศึกษาโปรแกรมแม่เหล็ก			↔							
3. ออกแบบและเขียนโปรแกรม					↔					
4. ทดสอบและปรับปรุงโปรแกรม								↔		
5. สรุปผลและเขียนปริญญานิพนธ์									↔	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจในทฤษฎีและเนื้อหาของ Multipath Fading Channel โดยอาศัยทฤษฎีของ Rayleigh
2. เข้าใจถึงผลของ Multipath Fading ที่ส่งผลกระทบต่อช่องส่งสัญญาณโดยอาศัยการกล้าสัญญาณแบบ BPSK และสามารถเปรียบเทียบได้ว่าแตกต่างกับช่องส่งสัญญาณแบบไม่มีผลของ Multipath Fading อย่างไร
3. เข้าใจถึงประโยชน์ของการเพิ่มการเข้ารหัสแบบ Convolution Code และ Interleaf ก่อนผ่านช่องส่งสัญญาณว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดได้มากแค่ไหน
4. เข้าใจการเขียนโปรแกรมแม่เหล็กในการสร้างแบบจำลองช่องส่งสัญญาณแบบ Multipath Fading โดยใช้การกล้าสัญญาณแบบ BPSK

1.6 รายละเอียดงบประมาณ

1. ค่าหนังสือ	400	บาท
2. ค่าจัดทำเอกสาร	400	บาท
3. ค่าพิมพ์เอกสาร	200	บาท
รวมทั้งสิ้น(หนึ่งพันบาทถ้วน)	<u>1000</u>	บาท

หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ



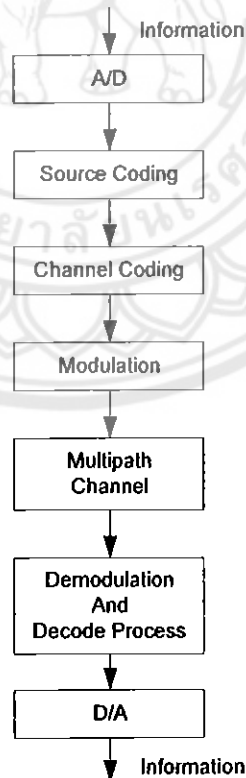
บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและเขียนโปรแกรมจำลองช่องส่งสัญญาณนี้จำเป็นต้องรู้ถึงความหมายของการอ่อนกำลังของสัญญาณ (Fading) และองค์ประกอบของช่องส่งสัญญาณว่ามีลักษณะอย่างไร รวมถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น ในบทนี้จะศึกษาในเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการส่งสัญญาณเบื้องต้น ความหมายเกี่ยวกับความน่าจะเป็นที่ใช้สำหรับช่องส่งสัญญาณแบบ Rayleigh Fading ที่มีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน การกล้ำสัญญาณแบบ BPSK และวิธีการเข้ารหัสพิเศษแบบ Convolution Code และ Interleaf ว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับข้อผิดพลาดและวิธีการแก้ไขข้อผิดพลาดในปลายทางได้อย่างไร

2.1 หลักการส่งสัญญาณ

ก่อนจะศึกษาเกี่ยวกับช่องส่งสัญญาณนั้นต้องเข้าใจถึงวิธีการส่งสัญญาณเบื้องต้นเสียก่อน เพื่อความเข้าใจได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามบล็อกที่แสดงตามรูปด้านล่างได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงลำดับการส่ง-รับของสัญญาณดิจิทัล

จากรูปที่ 2.1 จะสมมุติให้ข้อมูล (Information) เป็นสัญญาณอนาล็อก ชั้นแรกของการส่งข้อมูลจะต้องเปลี่ยนจากสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยผ่านบล็อก *A/D (Analog to-Digital)* ซึ่งบล็อกนี้จะประกอบไปด้วย

- 1) Sampling
- 2) Quantization
- 3) Line Coding

กระบวนการ Sampling มีหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลอนาล็อกที่ต่อเนื่องทางเวลา (continuous in-time) และขนาด (continuous in amplitude) ให้เป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete in time) และจะเก็บในรูปแบบของการสุ่มตัวอย่าง พอเสร็จกระบวนการนี้ข้อมูลจะไปผ่านกระบวนการ quantization เพื่อจัดระดับขนาดของข้อมูลแต่ละตัว ซึ่งจะแบ่งเป็นระดับแรงดันที่แน่นอนที่เรียกว่า quantization level ค่าทั้งสองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน และปรับให้มีค่าเท่ากับ quantization level ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการนี้ข้อมูลจะถูกปรับค่าขนาดที่แน่นอนและทำให้สัญญาณไม่มีความต่อเนื่องของขนาด (discrete in amplitude)

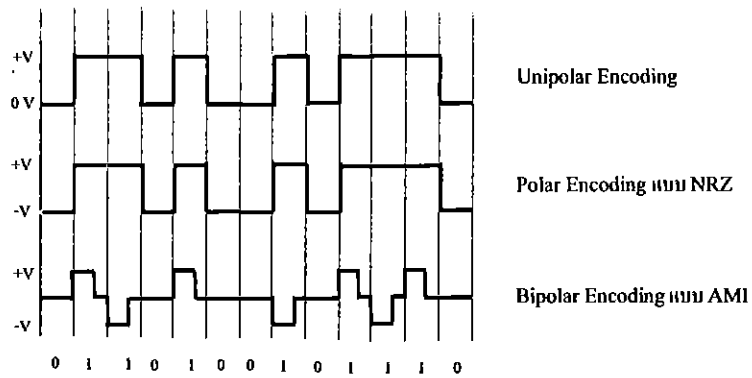
ขณะนี้ข้อมูลที่มีอยู่เรียกว่า “ข้อมูลดิจิทัล” ซึ่งจะนำไปเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยผ่านกระบวนการ Line Coding จุดประสงค์ในส่วนนี้คือ การเพิ่มคุณภาพให้กับสัญญาณที่ต้องการจะส่ง เช่น Self-Synchronization คือ ภาครับสามารถตรวจจับข้อมูลที่มีบิต 0 หรือ 1 เรียงต่อกันยาวๆ ได้ หรือสามารถตัดสินใจข้อมูลเมื่อเกิดสัญญาณรบกวนหรือการแทรกสอดสัญญาณ (ISI) ได้

Line Coding สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด แต่ชนิดจะถูกนิยามกับระดับแรงดันที่แสดงโดยบิต 0 และ 1 ซึ่งจะขอยกตัวอย่างการเข้ารหัสแบบต่างๆ ดังนี้

- *Unipolar encoding* คำว่า uni- แปลว่า หนึ่งเดียว และ polar แปลว่า ขั้ว แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่การเข้ารหัสสัญญาณชนิดนี้จะมีเพียงขั้วเดียวคือ ไม่บวกก็ลบซึ่งรูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างหนึ่งในการเข้ารหัสแบบ Unipolar encoding

- *Polar encoding* สำหรับการเข้ารหัสแบบนี้จะมีระดับแรงดันอยู่ 2 ระดับ คือ บวกและลบ ซึ่งมีประโยชน์มากในการกำจัด DC component ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานที่ดีขึ้น การเข้ารหัสมีอยู่หลายวิธี คือ NRZ (non return to zero) RZ (return to zero) และ Biphasic

- *Bipolar Encoding* การเข้ารหัสนี้จะมีแรงดัน 3 ระดับ (คล้ายกับ RZ encoding) การเข้ารหัสนี้มีกลไกที่ซับซ้อนมากขึ้น คือมีเงื่อนไขเพิ่มเติมเมื่อพบบิต 0 หรือ 1 เรียงต่อกัน ซึ่งทำให้มีข้อได้เปรียบการเข้ารหัสทั้งสองที่กล่าวมาในเรื่องของ Synchronization ตัวอย่างการเข้ารหัสแบบนี้คือ Bipolar AMI Encoding Bipolar 8-Zero Substitution (B8ZS)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่าง Line Coding ทั้ง 3 ชนิด

สำหรับบล็อก Line Coding มีอีกหลายวิธีที่น่าสนใจแต่ละจะขออธิบายอย่างสังเขปเท่านั้น ซึ่งถ้ามีความสนใจก็สามารถสืบค้นจากหนังสือ การสื่อสารในระบบดิจิทัลทั่วไป

หลังจากแปลงข้อมูลดิจิทัลมาเป็นสัญญาณดิจิทัล บล็อกถัดไปคือ *Source Coding* หรือ *Data Compression* บล็อกนี้มีหน้าที่ตามความหมายของมันคือ การบีบอัดข้อมูลที่ต้องการจะส่งให้มีขนาดที่น้อยที่สุด (ขนาดข้อมูลขนาดเล็กลงแต่ไม่ส่งผลถึงข้อมูล) ผลของบล็อกนี้ทำให้ค่า Source code rate (คือค่าจำนวนเฉลี่ยของของบิตที่ต้องการต่อสัญลักษณ์) มีค่าใกล้เคียงกับ Entropy (คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลของแหล่งกำเนิด) เพื่อให้ประสิทธิภาพในการส่งที่สูงที่สุด ซึ่งคุณภาพการบีบอัดจะแตกต่างกันขึ้นกับวิธีที่ใช้บีบอัด ตัวอย่างเช่น Huffman Coding Lempel-Ziv Fano lossless-coding เป็นต้น

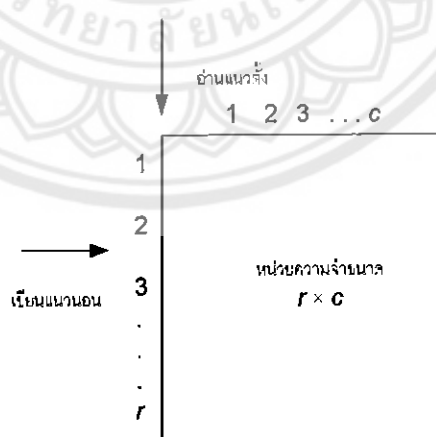
กระบวนการต่อไปเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในแง่ของความน่าเชื่อถือข้อมูลที่จะส่งซึ่งรับประกันได้ว่าสามารถตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดในการส่งได้ บล็อกนี้มีชื่อว่า *Channel Coding* มีวิธีที่น่าสนใจ เช่น BCH code Convolution code Interleaf เป็นต้น และต้องใช้ในปริณิณิพนธ์เล่มนี้คือ Convolution code และ Interleaf ซึ่งจะขออธิบายดังนี้

BCH (Bose, Chaudhuri, and Hocquenghem) การเข้ารหัสชนิดเป็นรหัสแบบบล็อกโค้ดประเภทหนึ่งที่น่าข้อมูลที่จะส่งมาแบ่งเป็นชุดข้อมูลขนาด k บิตและเพิ่มบิตพิเศษเข้าไปในแต่ละชุดข้อมูลเพื่อให้สามารถตรวจสอบบิตผิดพลาดได้ บิตพิเศษที่เพิ่มเข้าไปหาได้มาจากพีชคณิตของส่งสัญญาณที่เรียกว่า ฟิวด์กาตัว (Galois field) ในการใช้งานรหัส *BCH Code* มีประโยชน์มากเพราะมีความหลากหลายให้เลือกใช้ตามต้องการโดยสามารถออกแบบรหัส *BCH Code* ได้ว่าจะให้สามารถแก้ไขข้อมูลได้กี่บิตและแบ่งเป็นบล็อกข้อมูลละกี่บิตให้เลือกตามแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมกับช่องส่งสัญญาณ

Convolution Code รหัสคอนโวลูชันเป็นการเข้ารหัสแบบมีหน่วยความจำ (Code of memory) ข้อมูลที่ไม่จำกัดความยาวจะถูกป้อนเข้าสู่วงจรคอนโวลูชันอย่างต่อเนื่อง และผลลัพธ์ที่ได้ ออกทางด้านออกจะเป็นชุดคำรหัสที่มีความยาวเป็นสัดส่วนกับความยาวของชุดบิตข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา ความสามารถในการตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดของการเข้ารหัสนี้คือสิ่งที่เราจะสร้างวงจรในการเข้ารหัสจาก Generator polynomial ซึ่งจะพบว่าในแต่ Generator polynomial สามารถป้องกันบิตผิดพลาดได้ต่างกัน ยังมีจำนวนของ Generator polynomial มาก ก็ยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดได้มากขึ้น แต่ในทางกลับกันก็จะทำให้สิ้นเปลืองแบนด์วิดท์มากขึ้นด้วย

Interleaving เป็นวิธีการนำมาใช้งานกับระบบสื่อสารที่มีความผิดพลาดแบบเบิร์สต์ (Burst error) เนื่องจากการผิดพลาดแบบเบิร์สต์เป็นรูปแบบของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้บ่อยครั้งในการส่งสัญญาณไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นสาเหตุที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติเช่นฟ้าผ่า หรือ เกิดจากการบดบังจากสิ่งกีดขวางชั่วคราว ส่งผลให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นวิธีอินเทอร์ลีฟจึงมีประโยชน์มาก

หลักการของการทำอินเทอร์ลีฟคือ จะทำการแบ่งบิตข้อมูลออกเป็นบล็อกๆ ขนาด $r \times c$ บิต โดย r คือจำนวนแถวและ c คือจำนวนคอลัมน์ จากนั้นก็จะทำการสลับตำแหน่งของแต่ละบิตภายในบล็อกเดียวกันก่อนการส่งออก โดยอาศัยวิธีง่ายๆ คือ นำข้อมูลที่จะส่งมาเขียนลงในหน่วยความจำทีละแถวตามลำดับของข้อมูลที่เข้ามาจนครบหนึ่งบล็อก จากนั้นทำการอ่านข้อมูลเหล่านี้ในแนวตั้งเพื่อส่งออกทีละคอลัมน์จนหมดดังรูป 2.3 และเมื่อข้อมูลถึงภาครับแล้วจะทำการสลับตำแหน่งของบิตกลับมาเป็นปกติโดยอาศัยกระบวนการที่กลับกันกับภาคส่งมา



รูปที่ 2.3 วิธีการทำอินเทอร์ลีฟ

หลักการงานของทั้ง 3 วิธีที่ได้กล่าวไปนั้น วิธีการทำงานเป็นสิ่งที่ละเอียดและซับซ้อนมาก การอธิบายนี้จะขอเพียงอธิบายอย่างสังเขปเท่านั้น

หลังจากการเข้ารหัสข้อมูล ข้อมูลจึงมีคุณภาพสูงขึ้นในเรื่องของความมั่นใจและความเชื่อมั่นที่สามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางโดยไม่เกิดความผิดพลาด และมาถึงบล็อกสุดท้ายซึ่งบล็อกนี้มีหน้าที่นำสัญญาณที่มีอยู่ซึ่งเป็นสัญญาณเบสแบนด์ (Baseband Signal) สัญญาณนี้ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำ ซึ่งถ้าเกิดส่งสัญญาณนี้ผ่านช่องส่งสัญญาณไปจะเกิดการลดทอนอย่างมาก เพราะความถี่ไม่เหมาะสมกับช่องส่งสัญญาณ ตัวอย่างเช่น เสียงตะโกนของคน แม้ว่าคนๆ นั้นจะตะโกนเสียงดังมากๆ (สมมติว่ากำลังสัญญาณสูง) เสียงนั้นก็จะได้ยินเพียงระยะหนึ่งเท่านั้น ซึ่งกำลังเท่านี้้น้อยมากถ้าต้องการส่งในระยะทางที่ไกลขึ้น เช่น ส่งข้ามจังหวัด หรือ ข้ามประเทศ เป็นต้น

การทำให้สัญญาณเบสแบนด์มีความถี่ที่เหมาะสมในการส่งนั้นคือ กระบวนการกล้ำสัญญาณ (*Modulation*) ซึ่งการกล้ำสัญญาณในระบบดิจิทัลมีหลายวิธี เช่น ASK (Amplitude Shift Keying) FSK (Frequency Shift Keying) หรือที่กำลังสนใจและต้องนำมาใช้ในการทดลองในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ก็คือ BPSK (Binary Phase Shift Keying) ซึ่งจะอธิบายต่อไปนี้

BPSK (Binary Phase Shift Keying)

การกล้ำสัญญาณแบบ BPSK นี้มีลักษณะคล้ายกับการกล้ำสัญญาณแบบ PM (Phase modulation) ในอนาล็อกซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสในสัญญาณพาห์ (carrier signal) ที่เป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงกับสัญญาณอินพุตที่เข้ามา และลักษณะเฟสของ BPSK เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงจากบิต 1 เป็น 0 หรือบิต 0 เป็น 1 เฟสที่เปลี่ยนแปลงอาจเป็น 0° 90° หรือ 180° ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + D_p m(t)] \quad (2.1)$$

เมื่อ $m(t)$ คือ สัญญาณเบสแบนด์ที่มีขนาด ± 1

D_p คือ Phase Deviation Constant (radians/volt)

กรณีที่เทอมของ pilot carrier จะได้

$$\Delta\theta = D_p \quad (2.2)$$

และค่าดัชนีการกล้ำสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital modulation index) ถูกนิยามโดย

$$h = \frac{2\Delta\theta}{\pi} \quad (2.3)$$

ประสิทธิภาพของสัญญาณจะสูงสุดเมื่อกำลังในเทอมของสัญญาณข้อมูลจำเป็นต้องสูงสุดด้วย จะได้

$$\Delta\theta = D_p = 90^\circ = \frac{\pi}{2} \quad (2.4)$$

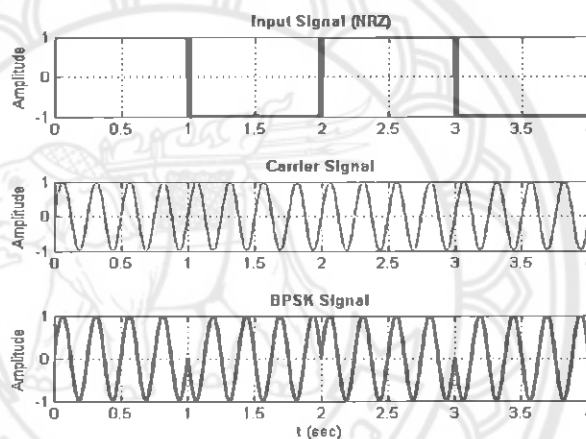
ดังนั้นค่า $h=1$

สัญญาณ BPSK จะกลายเป็น $s(t) = -A_c m(t) \sin(\omega_c t)$ (2.5)

แต่เพื่อความง่ายในที่นี้จะกำหนดให้สัญญาณ BPSK เป็นดังนี้

$$s(t) = \begin{cases} +A_c \sin(\omega_c t) & \text{for a binary 1} \\ -A_c \sin(\omega_c t) & \text{for a binary 0} \end{cases} \quad (2.6)$$

สัญญาณดังกล่าวนั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 ข้างล่างนี้ ซึ่งสัญญาณอินพุตเข้ารหัสแบบ NRZ และกล่าสัญญาณแบบ BPSK ที่มีความถี่ 4 เฮิร์ต



รูปที่ 2.4 แสดงการสร้างสัญญาณ BPSK จากสัญญาณ NRZ โดยใช้ความถี่ 4 เฮิร์ต ในการกล่าสัญญาณ

การตรวจจับสัญญาณ BPSK โดยอาศัยวิธี Integrate-and-Dump (Matched) Filter

การจะออกแบบตัวกรองที่เหมาะสม (Matched filter) สำหรับสัญญาณที่เป็นดิจิทัลนั้น มีวิธีการกรองอยู่หลายวิธีด้วยกันอาทิเช่น Costas loop Squaring loop หรือ Integrate-and-Dump เนื่องจากว่าสัญญาณ BPSK เป็นสัญญาณที่เป็นแบบ DSB-SC (Double-sideband suppressed-carrier) และสัญญาณประเภทนี้จะมีองค์ประกอบของสัญญาณ DC น้อยมากซึ่งจะไม่สามารถใช้วิธีการตรวจจับแบบ phase-locked tracking loop ได้ แต่ในที่นี้จะขออธิบายแต่วิธี Integrate-and-Dump Filter

ส่วนในหลักการของ Integrate-and-Dump Filter ถูกอธิบายในบทที่ 3 รวมถึงวิธีการทำงาน แต่สำหรับที่นี้จะขออธิบายอย่างสังเขปดังนี้

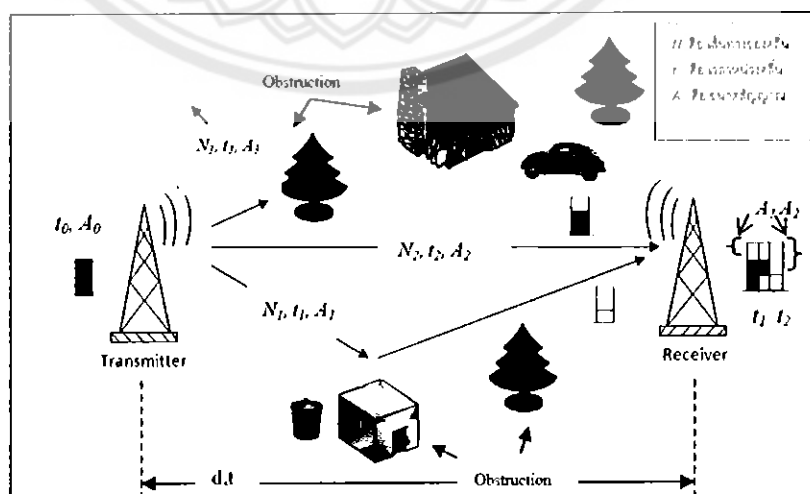
เมื่อสัญญาณ BPSK ที่ผ่านช่องส่งสัญญาณมาจะถูกคูณเข้ากับสัญญาณพาห้ ผลลัพธ์ที่ได้คือสัญญาณที่มีเฟสบวกจะมีค่ามากกว่า 0 และสัญญาณที่มีเฟสลบ จะมีค่าน้อยกว่า 0 ดังนั้นเมื่อทำการรวมสัญญาณตามจังหวะคาบเวลาจะสามารถแยกสัญญาณบิต 0 หรือ บิต 1 ออกมาได้และบิตที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณต้นทางเพื่อคำนวณหาค่า bit-error-rate ต่อไป

2.2 Multipath Fading in Rayleigh Channel

2.2.1 Fading และ Multipath ในช่องส่งสัญญาณคืออะไร

เมื่อทราบถึงหลักการส่งสัญญาณมาแล้ว สัญญาณที่เดินทางผ่านช่องส่งสัญญาณที่เป็นอากาศจะเกิดผลกระทบโคบังต่อสัญญาณ เมื่อการสื่อสารข้อมูลแบบสัญญาณดิจิทัล สัญญาณดิจิทัลมีลักษณะที่แตกต่างจากสัญญาณอนาล็อกตรงที่สามารถเพิ่มกระบวนการพิเศษทางคณิตศาสตร์ในภาคส่งและรับสัญญาณ ที่ซึ่งเมื่อส่งผ่านช่องส่งสัญญาณแล้วสามารถตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดในปลายทางได้ วิธีการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เพิ่มเข้าไปมีหลายวิธี ได้แก่ BCH Convolution Code เป็นต้น ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.1

การจัดการการส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพย่อมทำให้เกิดคุณภาพที่ดีต่อสัญญาณ แต่ปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในการสื่อสาร สิ่งแรกคือ สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น ภูเขา ต้นไม้ใหญ่ เป็นต้น ต่อไปก็คือ สิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น ตึกอาคารสูง ทั้งสองสิ่งล้วนเป็นสิ่งกีดขวางทางของสัญญาณ ส่งผลให้สัญญาณเดินทางไปชนสิ่งกีดขวางแล้วกลั่นั่นสะท้อนไปยังหลายทิศทาง (N_1, N_2 และ N_3) เรียกว่า *multipath* สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังสถานีรับจะอ่อนกำลังลง เรียกว่า *Fading* เพราะวาระยะทางที่สัญญาณเดินทางมากขึ้น (ระยะ $N_1 > N_2$) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของสัญญาณจากสถานีส่งถึงสถานีรับ

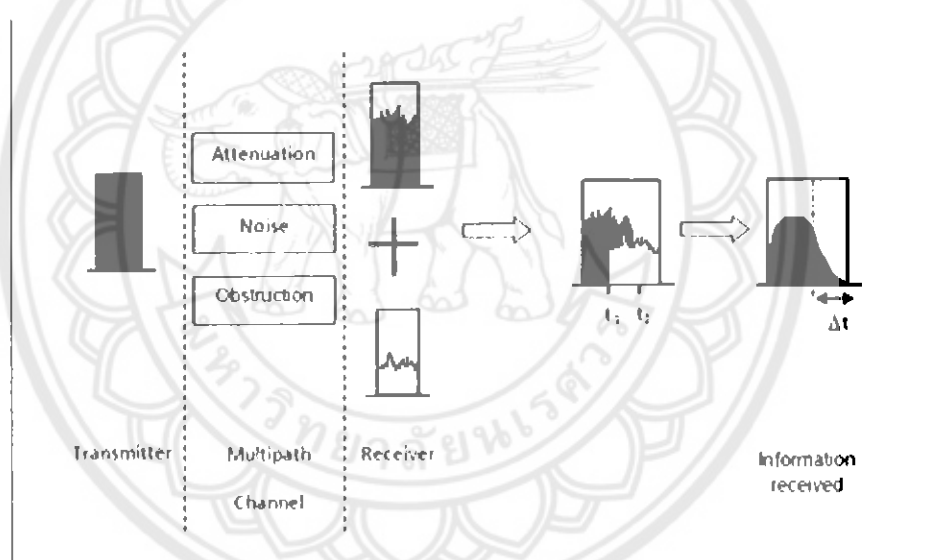
เมื่อพิจารณารูป 2.5 นั้นเป็นการจำลองการส่งสัญญาณเป็น 3 ทาง (3 paths) คือ N_1 , N_2 และ N_3 ตามลำดับและเวลาหน่วงเป็น t_1 , t_2 และ t_3 สุดท้ายคือการลดทอนคือ A_1 , A_2 และ A_3 เมื่อพิจารณาการเดินทางของแต่ละเส้นทางจะได้ว่า

เส้นทางที่ 1 (N_1) สัญญาณเดินทางไปชนสิ่งกีดขวางทำให้สัญญาณสะท้อนกลับไปที่สถานีรับโดยใช้เวลาหน่วงในการเดินทางเท่ากับ t_1 การลดทอนจากสัญญาณเท่ากับ A_1

เส้นทางที่ 2 (N_2) สัญญาณเดินทางเป็นเส้นตรงโดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆมาขวางกั้นจากสถานีส่งถึงสถานีรับโดยใช้เวลาหน่วงในการเดินทางเท่ากับ t_2 การลดทอนจากสัญญาณเท่ากับ A_2

เส้นทางที่ 3 (N_3) สัญญาณเดินทางไปชนสิ่งกีดขวางทำให้สัญญาณสะท้อนไปในทิศทางอื่นซึ่งสถานีรับไม่สามารถรับสัญญาณจากทิศทางนี้ได้

ข้อสังเกต การลดทอนของ A_1 จะมากกว่า A_2 เพราะว่าระยะทางในการเดินทางนั้นมากกว่าซึ่งสัมพันธ์กับเวลาในการเดินทางซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อการลดทอน



รูปที่ 2.6 แสดงถึงการลดทอนและเวลาหน่วงซึ่งเกิดจากช่องส่งสัญญาณ

จากรูปที่ 2.6 แสดงถึงกำลังของข้อมูลที่เพิ่งถูกส่งไปยังช่องส่งสัญญาณ เมื่อแล้วเมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านเข้าสู่ช่องส่งสัญญาณจะเผชิญกับการลดทอน (Attenuation) สัญญาณรบกวน (Noise) หรือ สิ่งกีดขวาง (Obstruction) เมื่อถึงสถานีรับรับสัญญาณจะเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณ ดังรูปที่ 2.6 ที่แสดงสัญญาณ 2 สัญญาณที่รับได้ เมื่อสัญญาณทั้งสองรวมกันก็จะเกิดการบานออกเท่ากับ Δt ทำให้ภาครับมีโอกาสไม่สามารถตัดสินใจที่รับมาได้ปัญหานี้เรียกว่าการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์หรือไอเอสไอ (Inter-Symbol Interference: ISI)

สาเหตุข้างต้นเป็นสาเหตุที่ทำให้การตัดสินใจข้อมูลปลายทางรับมาผิดพลาดได้ จึงต้องมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งต่อไปจะทำการศึกษาว่ามีความถี่ช่วงใดที่เกิดปัญหาบ้างและจึงหลีกเลี่ยงหรือป้องกัน ที่ซึ่งมีทฤษฎีที่มีการศึกษาในเรื่องนี้ เช่น Nakagami fading Weibull fading Rayleigh-fading หรือ Rician fading เป็นต้น และในปริณูณานิพนธ์นี้ได้เลือกศึกษาทฤษฎีของ Rayleigh-fading เพราะมีเนื้อหาที่เกี่ยวกับปัญหาสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่น โดยเฉพาะและจะอธิบายในส่วนต่อไป

2.2.2 ความน่าจะเป็นและทฤษฎีของเรเลย์

ในการสื่อสารข้อมูลผ่านช่องส่งสัญญาณจะเกิดสัญญาณประเภทหนึ่งที่ไม่สามารถรู้ค่าแน่นอนหรือไม่สามารถรู้ค่าล่วงหน้าได้ สัญญาณดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบสื่อสารในลักษณะที่เป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการ นั่นคือสัญญาณรบกวน (Noise) เนื่องจากสัญญาณสุ่ม (Random signal) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงแน่นอนได้ การจัดการกับสัญญาณประเภทนี้จึงต้องใช้หลักทางสถิติเข้าช่วย ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อนี้

2.2.2.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

ก่อนที่จะอธิบายถึงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจะขอกล่าวถึงฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสม ก่อนซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะทำให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น นิยามของนี้ คือ Cumulative Distribution Function (CDF) ของ Random Variable (RV) X คือ [3]

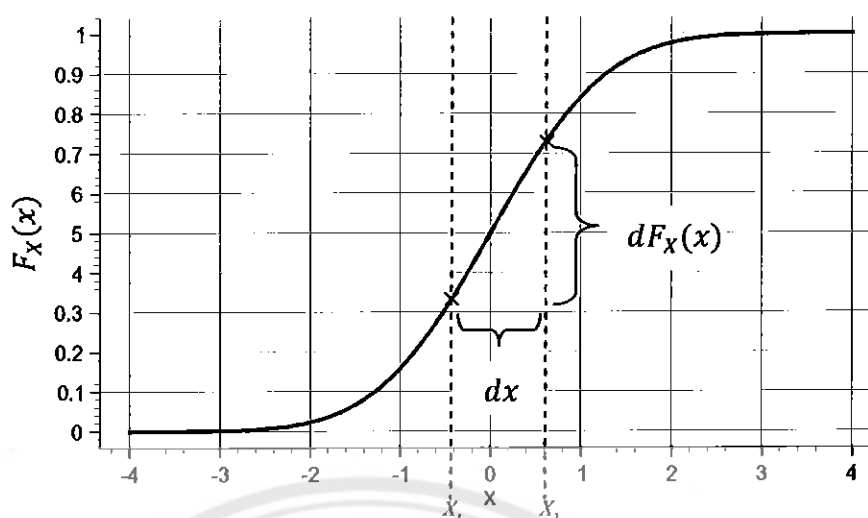
$$F_X(x) = P[X \leq x] \quad (2.2)$$

คุณสมบัติของ CDF ตามทฤษฎี คือ

$$1) F_X(-\infty) = 0 \quad (2.3 a)$$

$$2) F_X(\infty) = 1 \quad (2.3 b)$$

$$3) P[x_1 < X \leq x_2] = F_X(x_2) - F_X(x_1) \quad (2.3 c)$$



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟ CDF [5]

จากรูปแสดงถึงคุณสมบัติข้างต้นทำให้ทราบว่า CDF สามารถอธิบายเกี่ยวกับ RV ในรูปแบบต่อเนื่อง (continuous) และ ไม่ต่อเนื่อง (discrete) ได้ ดังนั้น เมื่อเราทราบถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของ CDF แล้ว พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่เราสนใจและมีความสำคัญคือ ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นหรือ PDF ซึ่งจะอธิบายต่อไปนี้

ในสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่อง การใช้นิยามฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นนั้นมีประโยชน์มาก และนิยามของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (ย่อว่า PDF) เป็นดังนี้

$$f_X(x) \triangleq \frac{dF_X(x)}{d(x)} \quad (2.4)$$

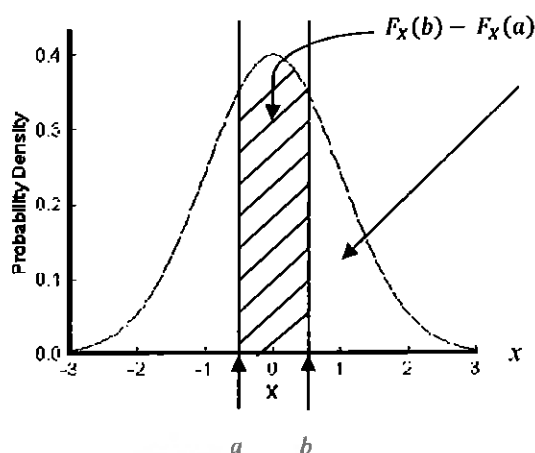
ซึ่ง $f_X(x)$ Probability Density Function ของ Continuous RV
คุณสมบัติของ PDF คือ

$$1) f_X(x) > 0 \quad (2.5 a)$$

$$2) \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1 \quad (2.5 b)$$

$$3) P(a < X \leq b) = F_X(b) - F_X(a) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (2.5 c)$$

ดังรูป 2.8 ข้างล่างนี้แสดงตัวอย่างของ PDF พื้นที่ใต้เส้นโค้งตรงบริเวณ $(a < X \leq b)$ ก็จะเป็นความน่าจะเป็นรวมในช่วงนั้นตามสมการ (2.5 c)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของ PDF

เมื่อเข้าใจในความหมายและนิยามของกราฟที่ได้แสดงไปทั้ง CDF และ PDF แล้วต่อไปจะต้องทำความรู้จักกับตัวแปรทางสถิติที่ไว้ใช้ในการอธิบายกราฟเพราะว่าตัวแปรนี้จะทำให้การวิเคราะห์ในเรื่องความน่าจะเป็นนั้นง่ายขึ้นและสะดวกเมื่อนำไปใช้กับฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบอื่นๆได้อีกด้วย

2.2.2.2 ตัวแปรทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ตัวแปรทางสถิติ นั้น ซึ่งมีตัวแปรหลายตัวที่สามารถใช้ในการอธิบายได้ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าคาดหวัง หรือจะเป็นค่าความแปรปรวน เป็นต้น และในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงรายละเอียดของตัวแปรทางสถิติที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1. ค่าคาดหวัง (Expected Values)

เมื่อพิจารณาตัวแปรสุ่ม X ที่ซึ่งเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง เช่น มีค่าเป็น $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ และมีค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดแต่ละค่าเป็น $P_X(x_1), P_X(x_2), P_X(x_3), \dots, P_X(x_n)$ ตามลำดับถ้าทำการทดลอง n ครั้ง ค่าคาดหวังสามารถหาได้จากสมการ

$$E[X] = \sum_{x \in S_X} x P_X(x) = m = \bar{X} \quad (2.6)$$

และกรณีที่ตัวแปรที่ตัวแปรสุ่มเป็นค่าต่อเนื่องและมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นเป็น $f_X(x)$ เราสามารถหาค่าเฉลี่ยได้จากสมการ

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx = m = \bar{X} \quad (2.7)$$

เป็นเพียงการเปลี่ยนจาก Summation มาเป็น integration ในกรณีที่เป็นค่าต่อเนื่อง ค่าคาดหวังนี้ บางครั้งอาจเรียกว่า ค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่ใช้ค่าที่แท้จริงของตัวแปรสุ่มที่ใช้ได้ แต่จะช่วยในการอธิบายค่าที่คาดหวังของตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกันจำนวนมากที่ได้จากการทดลองโดยเฉลี่ย

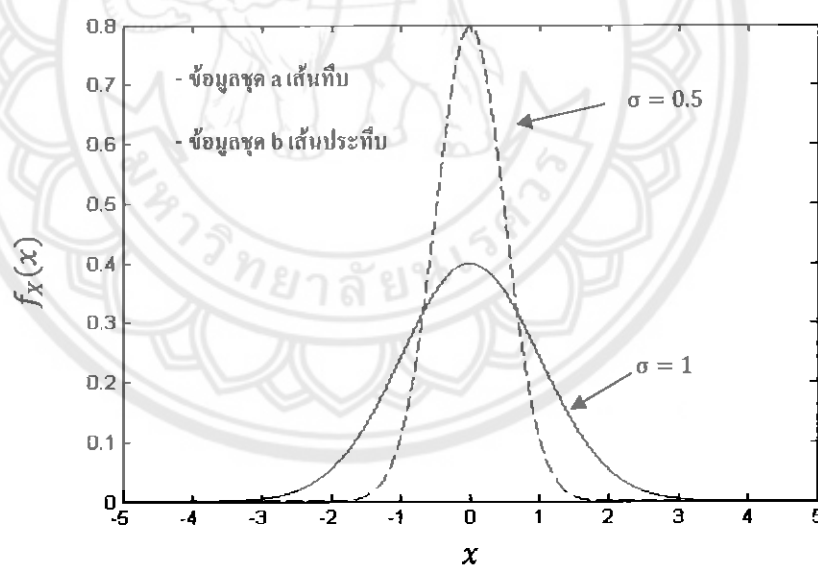
เช่นเดียวกันถ้าจะหาค่าคาดหวังที่เป็นฟังก์ชัน $g(X)$ ของตัวแปรสุ่ม X คือ

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)f_X(x)dx \quad (2.8)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2.7) เป็นตัวแปรที่นิยามสำหรับตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องที่ซึ่งสามารถถูกพิจารณาให้เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องได้ เช่น $E[X] = E[(X - \mu_X)^2]$ เป็นต้น

2. ค่าความแปรปรวน (Variance)

ค่าความแปรปรวนค่าที่ใช้แสดงการกระจายตัวของตัวแปรสุ่มว่ามีการกระจายกว้างหรือเกาะกลุ่ม ดังรูปที่ 2.9 แสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม 2 ชุด ซึ่งชุด a จะมีการกระจายตัวมากกว่าเมื่อเทียบกับชุด b (เส้นประ)



รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม 2 ชุด

ค่าความแปรปรวนคือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานยกกำลังสองที่ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 f_X(x)dx = E[(X-m)^2] \quad (2.9)$$

ค่าความแปรปรวน (variance) จากสมการข้างต้นสังเกตได้ว่า ถ้า X กระจายออกจากค่าเฉลี่ย m มากเท่าใด ค่าความแปรปรวนหรือความเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะสูงตามไปด้วยดังรูปที่ได้แสดงมา เมื่อนำสมการที่ (2.8) แยกเทอมทางขวามือของสมการจะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Var}[X] &= E[X^2 - 2mX + m^2] \\ &= E[X^2] - 2mE[X] + m^2 \\ &= E[X^2] - 2mm + m^2 \\ &= E[X^2] - m^2 \\ &= E[X^2] - (E[X])^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

ซึ่งจากสมการ (2.9) ทำให้ทราบว่าค่าความแปรปรวนสามารถหาจากค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มใดๆ ได้

2.2.2.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian PDF)

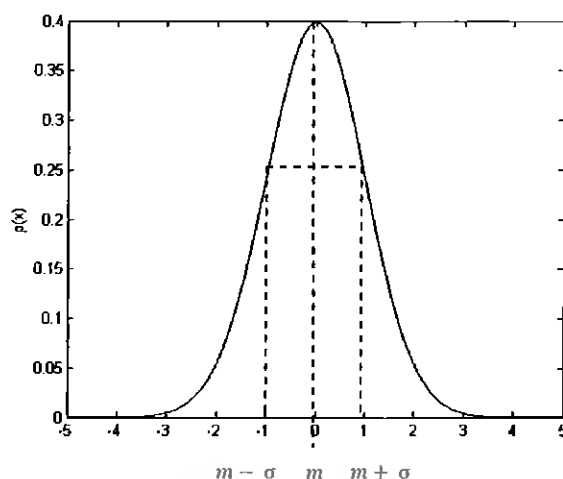
ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนอาจเรียกอีกชื่อได้ว่า ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal PDF) เนื่องจากการกระจายตัวแบบนี้สามารถนำไปใช้ได้กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติต่างๆ และในระบบสื่อสารก็จัดว่ามีความสำคัญอย่างมาก เพราะสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมักมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการกระจายแบบเกาส์เซียนเสมอ

การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนเป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด เพราะว่ามีทฤษฎีบททางสถิติที่เรียกว่า ทฤษฎีบทเซ็นทรัลลิมิต (Central limit theorem) สนับสนุนอยู่ [4] ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า ถ้ามีตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระจากกันอยู่ n ชุด แต่ละชุดมีค่าเฉลี่ย (ค่าคาดหวัง) ค่าความแปรปรวนเป็น $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ และ $\sigma^2_1, \sigma^2_2, \sigma^2_3, \dots, \sigma^2_n$ ตามลำดับผลบวกของตัวแปรสุ่ม n ชุดนี้ จะมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นเข้าหาการกระจายแบบปกติในขณะที่ n มีค่าใหญ่ขึ้น เนื่องจากการพิสูจน์ก่อนข้างอยู่ยากจึงไม่บอกกล่าวในที่นี้

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.11)$$

โดยที่ค่า m และ σ^2 เป็นค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนตามลำดับ ดังรูปที่ 2.10 ที่ซึ่งแสดงการกระจายแบบปกตินี้ ลักษณะเฉพาะของการกระจายตัวแบบนี้คือความสมมาตรกันทั้งฝั่งซ้ายและขวาของค่าเฉลี่ยดังรูป



รูปที่ 2.10 แสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียน

2.2.2.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเรเลย์ (Rayleigh PDF)

ทฤษฎีของเรเลย์ คือ โมเดลทางสถิติที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ สำหรับการทดลองนี้จะนำทฤษฎีนี้มาเป็นตัวสุ่มการหน่วงเวลาของสัญญาณที่เดินทางในทิศทางต่างๆที่เป็นผลมาจากสิ่งกีดขวาง

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเรเลย์สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & 0 \leq r \leq \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

เมื่อ σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การกระจายตัวแบบเรเลย์นี้มีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนดังนี้คือ ถ้าให้ X, Y เป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์เซียน 2 ชุด ที่อิสระจากกัน และมีค่าเฉลี่ย $m_x = m_y = 0$ และมีค่าความแปรปรวน $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma^2$ ในเงื่อนไขนี้การเชื่อมโยงความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Joint PDF) ของฟังก์ชันของ $f_X(x)$ และ $f_Y(y)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.13 a)$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.13 \text{ b})$$

$$f_{XY}(x, y) = f_X(x) \times f_Y(y) = \frac{e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \times \frac{e^{\frac{-y^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \quad (2.14 \text{ a})$$

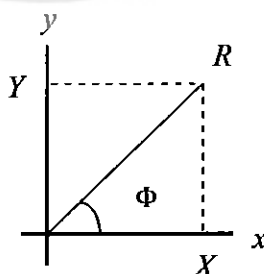
$$f_{XY}(x, y) = \frac{e^{\frac{-(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2} \quad (2.14 \text{ b})$$

ทำการแปลงให้อยู่ในรูปของพิกัดเชิงขั้ว (polar coordination) ซึ่งมีตัวแปรเป็น R และ Φ โดยการตั้งเงื่อนไขดังนี้

$$f_{R\Phi}(r, \phi) |drd\phi| = p_{XY}(x, y) |dxdy| \quad (2.15)$$

จากรูปที่ 2.11 จะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2 \\ \phi &= \arctan \frac{y}{x} \\ dxdy &= r dr d\phi \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$



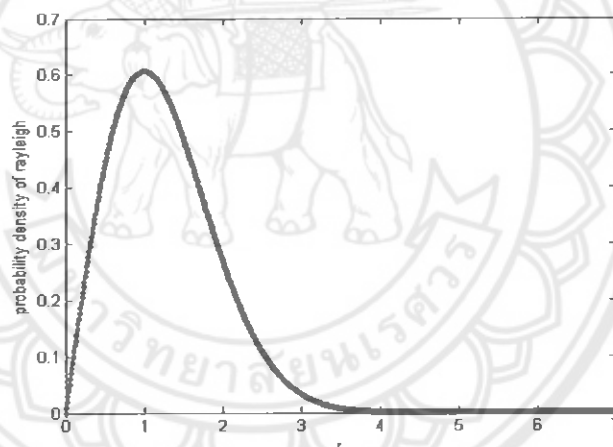
รูปที่ 2.11 แสดงพิกัดของแกนของสมการที่ 2.16

เมื่อแทนสมการ 2.14 b และสมการ 2.16 ลงใน 2.15 จะได้

$$f_{R\phi}(r, \phi) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \right) \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 จะเห็นได้ว่า เทอมที่อยู่ในวงเล็บจะมีลักษณะเหมือนกับการกระจายแบบเรเลย์ทุกประการโดยที่มีค่า $\sigma = \alpha$ และสำหรับเทอมที่เป็น $\frac{1}{2\pi}$ นั้นอธิบายได้ว่าเป็นความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรสุ่ม ϕ ซึ่งอิสระจากตัวแปรสุ่ม R จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลจากสมการ 2.17 จึงสามารถอ้างได้ว่าตัวแปรสุ่ม R และ ϕ เป็นอิสระจากกัน ทำให้รู้ว่า $f_{R\phi}(r, \phi) = f_R(r)f_\phi(\phi)$ โดยที่ $f_R(r)$ มีการกระจายแบบเรเลย์และ $f_\phi(\phi) = \frac{1}{2\pi}$

เมื่อนำสมการที่ 2.17 มาพล็อตเทียบกับค่า r ก็ได้กราฟดังกราฟที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการกระจายตัวของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเรเลย์

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเรเลย์นี้มีผลมาจากการคิดความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนที่เป็นอิสระจากกันมา *Joint PDF* กัน ซึ่งความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเรเลย์นี้มีการใช้งานในระบบสื่อสารอย่างกว้างขวาง และสำหรับการทดลองในปริภูมยานิพนธ์เล่มนี้ ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไป

2.2.3 ผลกระทบของช่องส่งสัญญาณ

เมื่อทราบถึงหลักการจากหัวข้อที่ผ่านมาแล้วนั้นช่องส่งสัญญาณแบบ Multipath จะทำให้สัญญาณที่ภาครับเกิดแทรกสอดกันของสัญญาณใกล้เคียง แต่ในช่องส่งสัญญาณในปริภูมิตwodimentional นี้จะทำการศึกษานั้นจะประกอบไปด้วย

1. การลดทอนของสัญญาณเนื่องมาจากระยะทางในการเดินทางของสัญญาณจากสถานีส่งไปถึงสถานีรับ

2. สัญญาณรบกวนที่เป็นแบบเกาส์เซียน

3. การหน่วงเวลาที่เกิดจากสิ่งกีดขวางโดยอาศัยทฤษฎีของเรเลย์

2.2.3.1 การลดทอนของสัญญาณ (Attenuation)

การลดทอนของสัญญาณนั้นส่วนใหญ่จะเกิดจากพลังงานที่สูญเสียหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานอื่น ซึ่งส่งผลให้ขนาด (Amplitude) ของสัญญาณลดลง การลดทอนจะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางดังสมการข้างล่างนี้ [7]

$$L_p = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น และ R คือระยะทางของคลื่นที่เดินทาง

ซึ่งการวิเคราะห์ระยะทาง R นี้จะคิดจากเวลาในการเดินทางของคลื่น (ในที่นี้จะกำหนดไว้เป็นค่าคงที่) บวกกับเวลาที่หน่วงของคลื่นซึ่งจะถูกนำมาเป็นเวลารวมที่คลื่นใช้เดินทางซึ่งแสดงได้จากสมการ

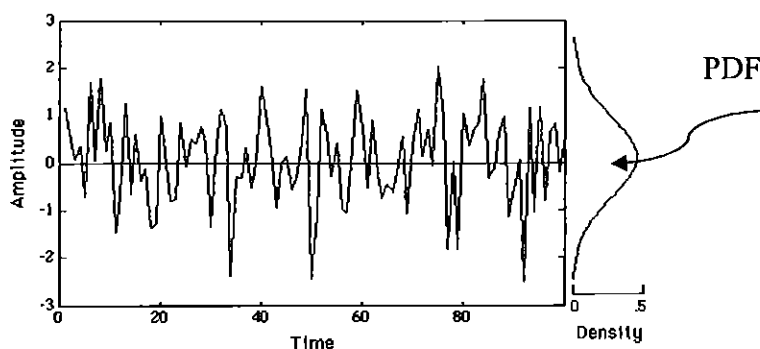
$$R_n = v \times t = c \times (t + t_n) \quad (2.19)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของคลื่นที่เดินทางเท่ากับ 3×10^8 m/s

R_n คือ ระยะทางของคลื่นที่เดินทางของคลื่นที่ n

2.2.3.2 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian noise)

ในระบบการสื่อสารทั่วไปสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในระดับแรกๆคือสัญญาณรบกวน สัญญาณเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่เราส่งไป สัญญาณรบกวนนี้เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุที่พบบ่อยในระบบสื่อสารนี้ เช่น อิมพัลส์บางครั้งอาจเกิดจากฟ้าผ่า ความร้อนที่เกิดจากสภาพอากาศ เป็นต้น ในที่นี้จะแสดงสัญญาณรบกวนที่เป็นแบบเกาส์เซียนซึ่งสร้างมาจากความหนาแน่นความน่าจะเป็นในสมการที่ 2.11 ซึ่งในรูปที่ 2.13 ดังนี้



รูปที่ 2.13 สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน [8]

จากรูป 2.13 แสดงถึงค่าสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะแวกซ์ตัวอยู่ในขอบเขตของค่า *PDF* เพราะว่าค่า *PDF* แสดงถึงความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จะเกิดขึ้นจากภาพค่า *PDF* มีค่าสูงบริเวณ -1 ถึง 1 ดังนั้นขนาดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นจะอยู่ที่ -1 ถึง 1 เป็นส่วนใหญ่

2.2.3.3 การหน่วงเวลาที่เกิดจากสิ่งกีดขวางโดยอาศัยทฤษฎีของเรเลย์

สัญญาณที่เดินทางผ่านตัวกลางใดๆ ไม่ว่าจะเป็นตัวกลางที่อยู่ในสายทองแดง สายใยแก้วนำแสง หรือจะเป็นอากาศ การหน่วงเวลานั้นอาจจะเกิดได้จากหลายกรณีด้วยกัน เช่น ในสายใยแก้วนำแสงที่เป็นแบบมัลติโหมดแสงในแต่ละโหมดจะมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน คือแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยจะเดินทางได้เร็วกว่าและไปถึงปลายทางก่อนแสงที่มีความยาวคลื่นมากซึ่งเมื่อเปรียบเทียบพัลส์สัญญาณในภาครับและภาคส่งแล้วจะพบว่าในภาครับสัญญาณพัลส์จะเกิดการบานออกของสัญญาณ และเช่นกันกับกรณีของการส่งสัญญาณที่เป็นแบบสัญญาณวิทยุที่กำลังจะได้ถูกนำมาวิเคราะห์ คลื่นที่ส่งออกไปจะเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางในระหว่างทางทำให้สัญญาณที่เดินทางมาในเวลาเดียวกันไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ผลกระทบนี้เป็นสิ่งสำคัญต่อข้อมูลในระบบสื่อสาร คือ การแทรกสอดของสัญญาณหรือการซ้อนทับกันของข้อมูล

การหน่วงเวลาในปริภูมิพหุนิพจน์นี้พิจารณาจะใช้ทฤษฎีของเรเลย์ในสร้างแบบจำลองโดยอาศัยความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเรเลย์ในสมการที่ 2.12 จำลองการหน่วงเวลาของสัญญาณที่ผ่านช่องส่งสัญญาณ

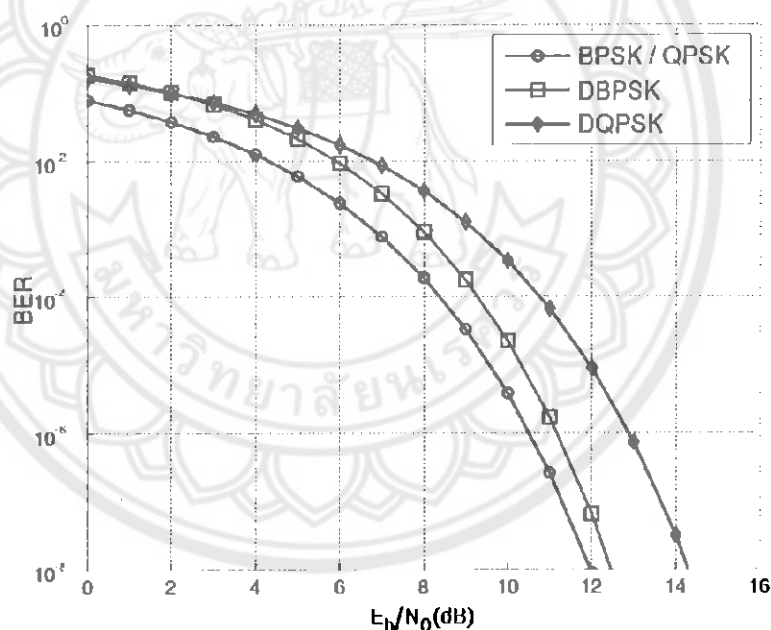
2.3 การทดสอบค่าอัตราความผิดพลาด (Bit error rate)

การทดสอบ bit-error-rate หรือ *BER* เป็นการทดสอบเพื่อต้องการบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ภาคส่ง (Transmitter) ภาครับ (Receiver) และช่องส่งสัญญาณ ซึ่งหมายความว่า กำลังของสัญญาณที่ถูกส่งไปผ่านช่องส่งสัญญาณและภาครับรับมามีโอกาสเกิดบิตผิดพลาดอยู่เท่ากับเท่าไรปกติค่า *BER* ที่ต้องการจะอยู่ที่ประมาณ 10^{-6} เป็นอย่างน้อย (ค่า 10^{-6} นั้นหมายความว่า เมื่อส่งบิตไป 10^6 บิต หรือ 1 ล้านบิตจะมีโอกาสเกิดบิตที่ผิดพลาดเท่ากับ 1 บิต)

ขั้นตอนแรกในการหาค่า BER ต้องทำการสร้างบิตข้อมูล 0 และ 1 ที่ได้มาจากการสุ่ม เพื่อนำบิตข้อมูลเหล่านี้ไปกล้ำสัญญาณเพื่อส่งผ่านช่องส่งสัญญาณ (Modulation) โดยช่องส่งสัญญาณจะมีทั้งการลดทอนและสัญญาณรบกวน หลังจากที่ได้รับสัญญาณมาสัญญาณดังกล่าวจะถูกทำการ demodulation กลับมาเป็นบิตข้อมูลอีกครั้ง สุดท้าย ก็ทำการเปรียบเทียบบิตข้อมูลชุดแรกที่ถูกส่งมากับบิตข้อมูลชุดที่สองที่ผ่านการ demodulation ว่าเกิดบิตผิดพลาดอยู่ที่บิตต่อบิตที่ส่งมาทั้งหมด

Bit-error-rate บ่อยครั้งจะถูกนำมาอธิบายกับกราฟ 2 มิติ ที่ประกอบไปด้วย แกนนอน (x-axis) คือ Signal-to-noise ratio (SNR) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ E_b/N_0 (energy-per-bit ต่อ one sided power spectral density of the noise) และมักจะเขียนอยู่ในหน่วยเดซิเบล (decibel) และ ส่วนแกนตั้ง (y-axis) คือ bit-error-rate ซึ่งได้ถูกอธิบายไว้ข้างต้นแล้ว

การสร้างกราฟ BER เทียบกับ SNR นั้นสามารถทำได้โดยการพล็อตค่าแต่ละ SNR (dB) ที่ต้องการซึ่งค่า SNR นั้นจะได้ค่า BER ที่เฉพาะของแต่ละสัญญาณและช่องส่งสัญญาณนั้นๆ



รูปที่ 2.14 เปรียบเทียบค่า BER ในการกล้ำสัญญาณที่แตกต่างกัน [12]

สำหรับรูปที่ 2.14 เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกราฟ BER ที่เกิดจากการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณเดียวกันแต่มีการกล้ำสัญญาณที่แตกต่างกัน จากภาพจะมองเห็นถึงสมรรถนะของสัญญาณ ซึ่งในโครงงานนี้จะอธิบายต่อไปสำหรับการวิเคราะห์ค่า BER ในช่องส่งสัญญาณแบบ multipath

การสร้างค่า SNR

ค่า Signal-to-noise ratio (SNR) หรือ E_b/N_0 ขอบบยายก่อนว่าค่า E_b คือ พลังงานในหนึ่งบิต (energy-per-bit) ซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานหารด้วยจำนวนบิตของสัญญาณ หรือ ค่าเฉลี่ยพลังงานของสัญญาณคูณด้วยช่วงเวลาใน 1 บิต และสามารถเขียนให้อยู่ในสมการที่ 2.20 ดังนี้

$$E_b = \frac{1}{N \cdot f_{bit}} \sum_{n=1}^N x^2(n) \quad (2.20)$$

เมื่อ N คือ จำนวนบิตทั้งหมดของสัญญาณ

f_{bit} คือ อัตราการส่งข้อมูลใน 1 วินาที (bit-rate in bit-per-second)

ในส่วนของ N_0 คือ one-sided spectral density of the noise หรือ กำลังของสัญญาณรบกวนใน 1 เฮิร์ต ของแบนด์วิดท์ของสัญญาณ สำหรับสัญญาณที่มีอัตราการสุ่ม (sampling rate) เท่ากับ f_s เฮิร์ต แบนด์วิดท์ของสัญญาณรบกวนจะเป็นครึ่งหนึ่งของค่า f_s ดังสมการที่ 2.21 ต่อไปนี้

$$N_0 = \frac{\sigma_n^2}{(f_s / 2)} \quad (2.21)$$

เมื่อ σ_n^2 คือ ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (noise variance)

N_0 คือ one-sided spectral density of the noise in W/Hz

ในการทดสอบประสิทธิภาพของสัญญาณไม่ว่าจะในเรื่องของช่องส่งสัญญาณ การกล้ำสัญญาณหรือว่าจะเป็นการทดสอบของการแก้ไขบิตที่ผิดพลาด เช่น Convolution Code BCH code เป็นต้นล้วนต้องใช้กราฟ BER ในการวัดประสิทธิภาพทั้งสิ้น โดยทั่วไปการทดสอบนั้นจะกำหนดค่าของพลังงานในการส่งคงที่และควบคุมค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนแทน ดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วเพราะว่าในความเป็นจริงต้องการทดสอบพลังงานในการส่งที่เท่ากันในสถานะสัญญาณรบกวนที่แตกต่างกันจึงไม่นิยมปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งแต่สัญญาณรบกวนคงที่

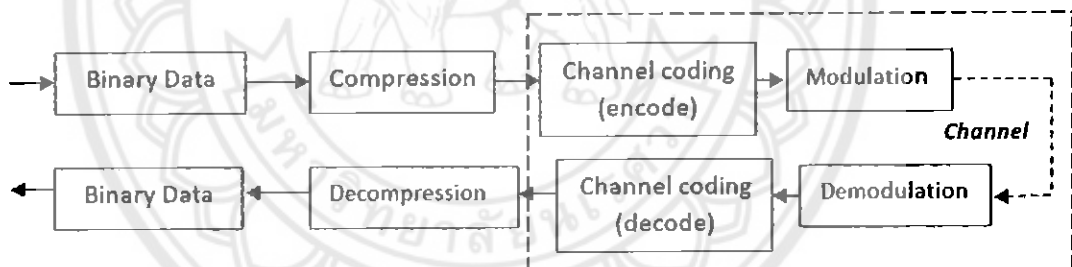
สำหรับเนื้อหาในบทที่ 2 ที่ได้กล่าวมานั้นได้อธิบายในส่วนของทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ และในบทถัดไปจะกล่าวถึงขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์ที่จะนำเอาเนื้อหาจากบทนี้ไปใช้ เพื่อหาผลลัพธ์สำหรับการทดลองนี้และนำไปสรุปผลการทดลองต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงการ

ในขั้นตอนการส่งสัญญาณใดๆจำเป็นต้องส่งผ่านช่องส่งสัญญาณไม่ว่าทางใดก็ตามหนึ่ง เช่น สายไฟ สายใยแก้วนำแสง หรือ อากาศ ซึ่งแต่ละอย่างก็มีคุณสมบัติที่ดีและเสียแตกต่างกัน อากาศนั้นเป็นตัวกลางที่สะดวกในการสื่อสารอย่างหนึ่งและเป็นที่ยอมรับมาก สมรรถนะของสัญญาณ เป็นสิ่งที่แสดงถึงความสำเร็จของการสื่อสาร แต่เมื่อสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่ไม่อาจสามารถ กำหนดได้ เช่น การกีดขวางของต้นไม้ หรือ ภูเขา อาจจะเป็นสิ่งกีดขวางใหญ่ที่อยู่รอบล้อมในเมือง ใหญ่ การแก้ปัญหาที่กล่าวมานั้นมีมากมาย เช่น การเพิ่มกำลังส่ง การเปลี่ยนสถานที่ของสถานีส่ง สัญญาณ เป็นต้น แต่ทว่า ในกรณีวิธีข้างต้นอาจจะปฏิบัติได้ยาก หรือเป็นสิ่งที่สิ้นเปลืองมากเกินไป ดังนั้น การที่เราศึกษาผลของเหตุการณ์แล้วเก็บมาไว้บันทึกเป็นสถิติ แล้วแก้ปัญหาเฉพาะจุด จึงเป็น วิธีทางเลือกที่ช่วยในการพยากรณ์ผลที่จะเกิดขึ้น จากการส่งสัญญาณ

สำหรับการทดลองเพื่อหาผลกระทบของช่องส่งสัญญาณแบบ multipath จะเลือกทำเฉพาะ ส่วนของที่อยู่ในกรอบเท่านั้นและจะอธิบายผลจากการทดลองในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 แสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการของข้อมูล

จากรูปที่ 3.1 บล็อก Binary Data จะทำการสุ่มบิต 0 และ 1 ซึ่งเป็นข้อมูลดิจิทัลขึ้น และเข้าสู่บล็อก Channel coding เพื่อทำการเข้ารหัสสัญญาณแบบ Convolution Code และการประยุกต์ใช้อินเทอร์ลีฟ (ข้ามกระบวนการ Compression) และกล้ำสัญญาณแบบ BPSK (Binary Phase Shift Keying) เข้าสู่ช่องสัญญาณและนำข้อมูลที่ผ่านช่องส่งสัญญาณ ต่อจากนั้นจะนำข้อมูลดังกล่าวไปสู่ขั้นตอน Demodulation และ ถอดรหัสต่อไป กระบวนการต่างๆเหล่านี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการทดลองต่อไป

1573634/

ร/ง.

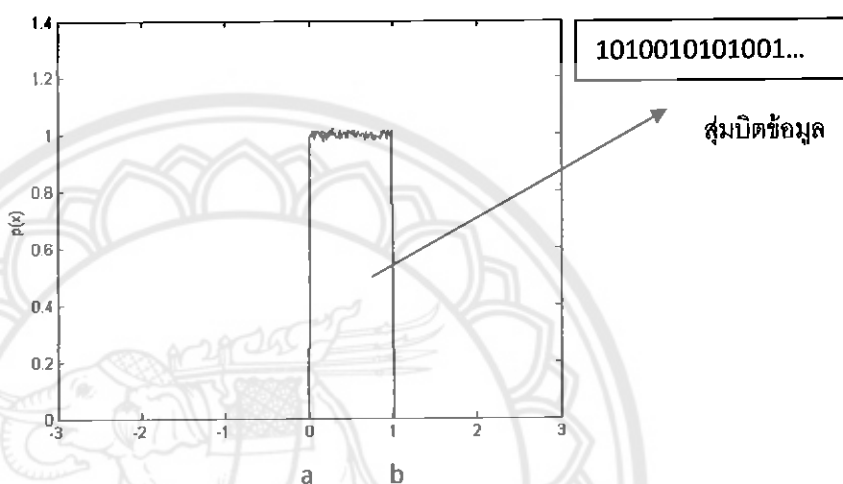
พ729ด/

2653

3.1 การออกแบบโปรแกรม

3.1.1 การสร้างสัญญาณข้อมูล

การสร้างข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการทดลองได้นำมาจากการสุ่มค่าบิต 0 และ 1 ที่มีค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ซึ่งนำมาจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบยูนิฟอร์มที่มีค่า $b = 1$ และ $a = 0$ ดังรูปภาพที่ 3.2 จากนั้นจะนำบิตที่ได้มาเข้ากระบวนการ Line Coding แบบ NRZ (non return to zero) และสุดท้ายก็ทำการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK เพื่อนำสัญญาณเข้าสู่ช่องส่งสัญญาณต่อไป



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบยูนิฟอร์ม ที่มีค่า $b = 1$ และ $a = 0$

สัญญาณที่ถูกสุ่มมาจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งจะทำให้การปรับค่าให้มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 เท่านั้น โดยอาศัยคำสั่ง round ในโปรแกรมเมทแลป ดังนั้นจึงสามารถได้ค่าบิตที่สุ่มออกมาในรูปแบบข้อมูลดิจิทัลเพื่อนำไปสู่ขั้นตอนต่อไป

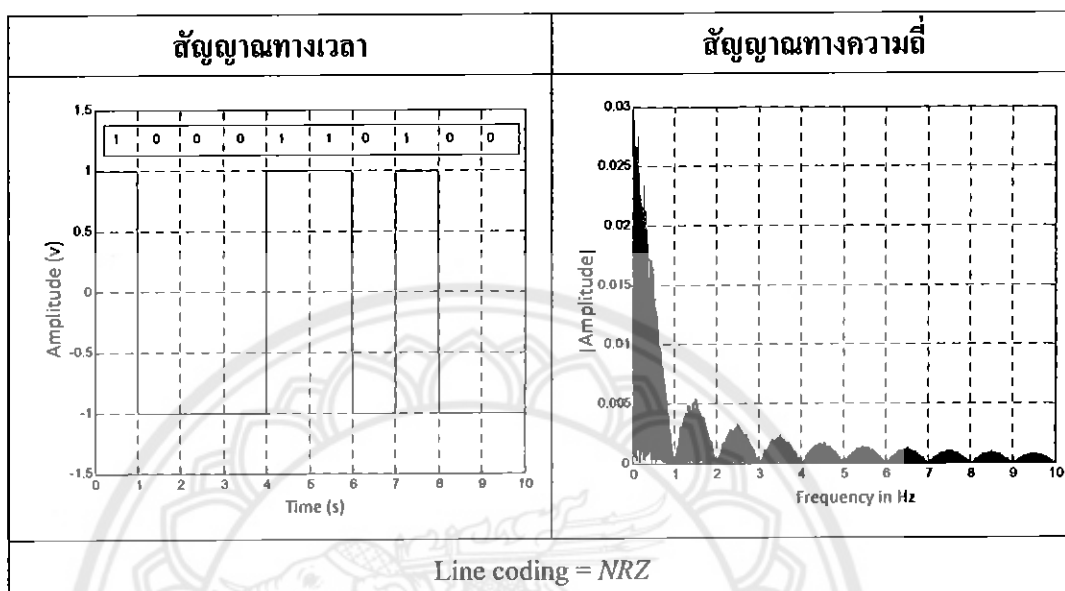
3.1.2 การเข้ารหัสสัญญาณแบบ Convolution code และ Interleaf

เหตุผลของการเข้ารหัส คือ การเพิ่มความสามารถที่จะสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่ถูกส่งไปเมื่อผ่านช่องส่งสัญญาณ ความสามารถในการเข้ารหัสในการทดลองนี้สามารถแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้สูงสุดจำนวน 3 บิตที่ติดกัน

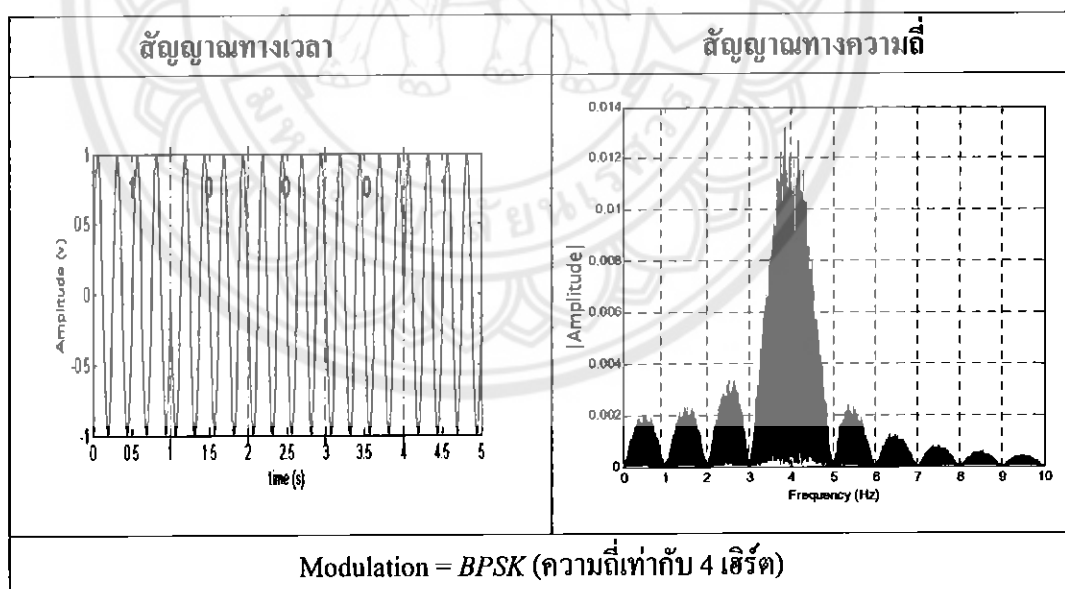
และในส่วนของอินเทอร์ลีฟนั้นจะช่วยในเรื่องของการกระจายบิตที่ผิดที่อยู่ติดกันให้กระจายออกไปซึ่งในทางทฤษฎีเชื่อว่าจะสามารถช่วยในเรื่องของการแก้ไขข้อผิดพลาดได้มากขึ้น

3.1.3 การกล้ำสัญญาณ (Modulation)

การกล้ำสัญญาณจะผ่านกระบวนการ Line coding แบบ NRZ ดังรูปที่ 3.3 แล้วนำไปกล้ำสัญญาณแบบ BPSK ซึ่งแสดงในรูป 3.4 ข้างล่างนี้



รูปที่ 3.3 กระบวนการ Line coding แบบ NRZ



รูปที่ 3.4 กระบวนการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK

จากรูปที่ 3.3 ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของ NRZ คือ เมื่อบิตข้อมูลเป็น 1 ค่าของสัญญาณจะมีค่าเป็น 1 และบิตข้อมูลเป็น 0 ค่าจะเป็น -1 ตามลำดับ

$$\text{สัญญาณ NRZ} = \begin{cases} \text{bit 1} & \rightarrow 1 \\ \text{bit 0} & \rightarrow -1 \end{cases} \quad (3.1)$$

ส่วนทางความถี่สังเกตได้ว่าสัญญาณทางความถี่ของ NRZ จะอยู่ที่ความถี่ต่ำหรือความถี่ Base Band ซึ่งมีค่าอยู่ใกล้ศูนย์และสามารถสังเกตได้ว่าขนาดของสัญญาณที่มีค่าเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (first-null-bandwidth) เท่ากับ 1 เฮิร์ต ซึ่งหมายความว่าสัญญาณนั้นมีอัตราการส่งข้อมูล (bits rate) เท่ากับ 1 บิตต่อวินาที

และจากรูปที่ 3.4 ลักษณะของสัญญาณทางเวลาของ BPSK คือ เฟสของสัญญาณจะเปลี่ยน 180° เมื่อ สัญญาณของ NRZ มีค่าเป็น -1 หรือบิต 0 หรือไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ สัญญาณของ NRZ มีค่าเป็น 1 หรือบิต 1

$$\text{สัญญาณ BPSK} = \begin{cases} \text{bit 1} & \rightarrow 0^\circ \\ \text{bit 0} & \rightarrow 180^\circ \end{cases} \quad (3.2)$$

เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ทางความถี่ของสัญญาณ BPSK ที่มีความถี่พาห์เท่ากับ 4 เฮิร์ต ซึ่งเป็นการย้ายความถี่ของสัญญาณ NRZ จากความถี่ใกล้กับ 0 มาเป็น 4 เฮิร์ต ดังรูป 3.4 ขวามือ

3.1.4 ช่องส่งสัญญาณ (Channel)

ช่องส่งสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.1.4.1) Noise ได้มาจาก Additive White Gaussian Noise (AWGN)

3.1.4.2) Attenuation ได้มาจาก Path loss

3.1.4.3) Time delay ได้มาจาก Delay

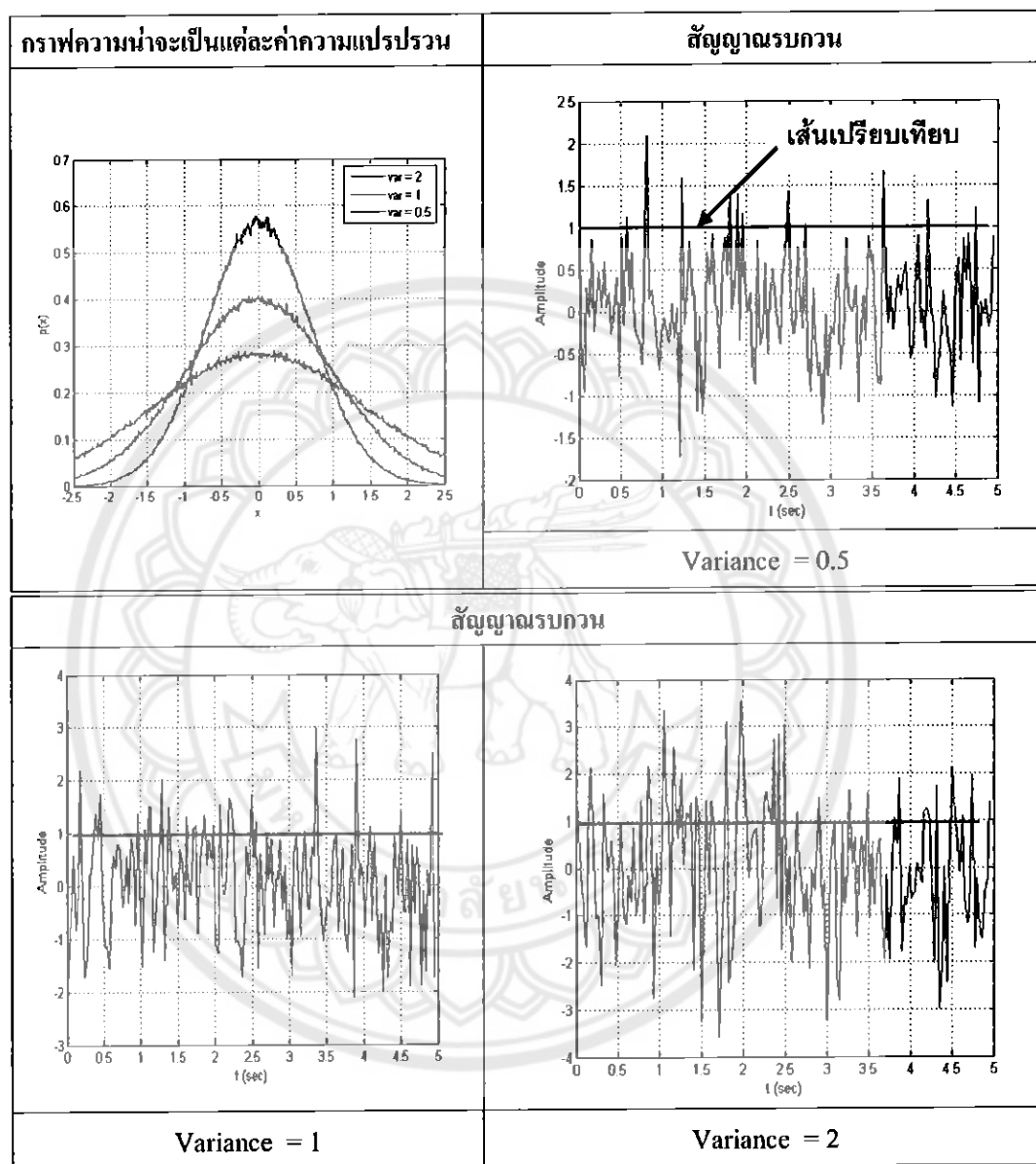
3.1.4.1) Noise เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับ E_b/N_0 หรือ SNR per bits (ในโครงการนี้จะเรียกค่านี้ว่า SNR) กล่าวคือ เมื่อ SNR มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนแบบ (AWGN) มีความรุนแรงมากขึ้น ดังรูปที่ 3.5

การคิด E_b/N_0

E_b/N_0 (Energy per bit to Noise power spectral density ratio) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้ทดสอบประสิทธิภาพของสัญญาณในระบบดิจิทัล ค่านี้สามารถเรียกว่า Signal to Noise ratio per bit ดังนั้น การกำหนดค่า E_b/N_0 ส่วนใหญ่จะอยู่ในหน่วยเดซิเบล (dB) ซึ่งจะแสดงในผลการทดลองต่อไป

เนื่องจากค่า E_b ของสัญญาณที่วัดได้มาจากภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัวเช่น การลดทอน หรืออัตราการส่งข้อมูล (bit rate) ตัวอย่างเช่น อัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 1 บิตต่อวินาที ค่า E_b ของสัญญาณที่เป็น cosine และ sine จะมีค่าเท่ากับ 0.5 แต่เมื่ออัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 2 บิตต่อวินาทีค่า E_b ของสัญญาณจะลดลงครึ่งหนึ่งเป็น 0.25 แต่ทว่าเพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมนั้นเรากำหนดให้ค่าของ E_b คงที่แต่จะไปเพิ่มค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน เช่น

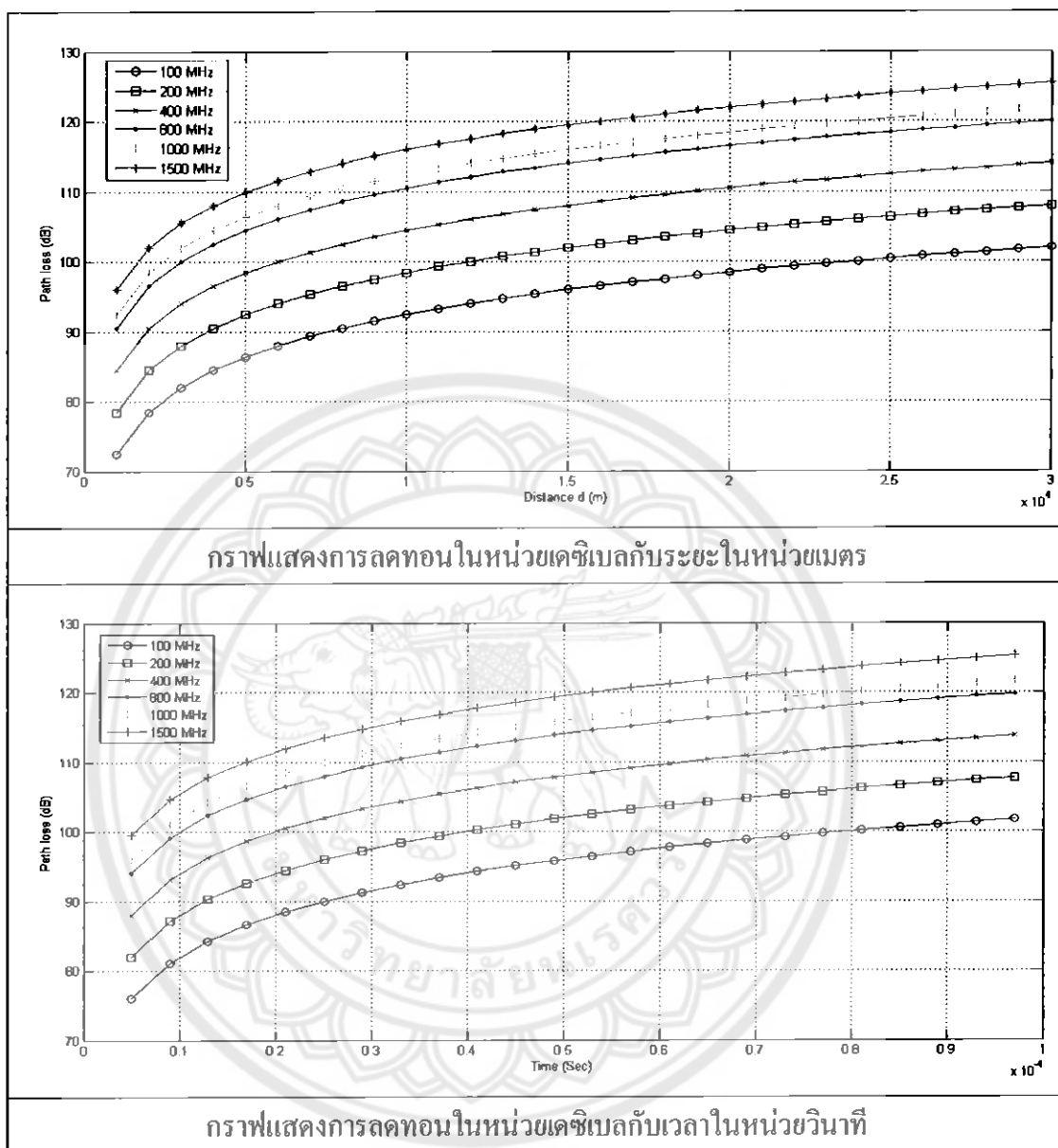
ถ้า E , เท่ากับ 0.5 เปลี่ยนเป็น 0.25 (สามารถรู้ได้จากเมื่อเราส่งข้อมูลแบบอัตราส่งข้อมูลเท่ากับ 2 บิตต่อวินาที) ดังนั้นจึงดูค่าความแปรปรวน ด้วย 2 เพราะ ลดลง 2 เท่า (จาก 0.5 ไปเป็น 0.25) เป็นต้น



รูปที่ 3.5 แสดงข้อแตกต่างของสัญญาณรบกวนในค่าความแปรปรวน ต่างๆ

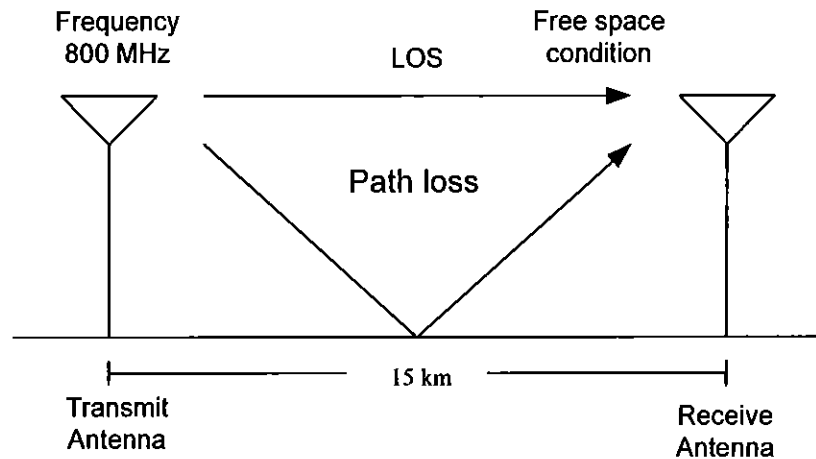
จากรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าเมื่อค่าความแปรปรวน (Variance) ของสัญญาณรบกวนเพิ่มสูงขึ้นค่าขนาดของสัญญาณ (Amplitude) ก็เพิ่มสูงขึ้นตามภาพ อย่างเช่น ค่าความแปรปรวน เท่ากับ 0.5 กับ 2 ขนาดของสัญญาณสามารถเปรียบเทียบได้จากเส้นอ้างอิงดังรูปเมื่อสังเกตค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.5 จะมีค่าน้อยกว่า 2 อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมากขึ้นจะส่งผลถึงความรุนแรงของสัญญาณรบกวนที่เพิ่มสูงขึ้น

3.1.4.2) การลดทอน (Attenuation)



รูปที่ 3.6 แสดงการลดทอนในความถี่ต่างๆ

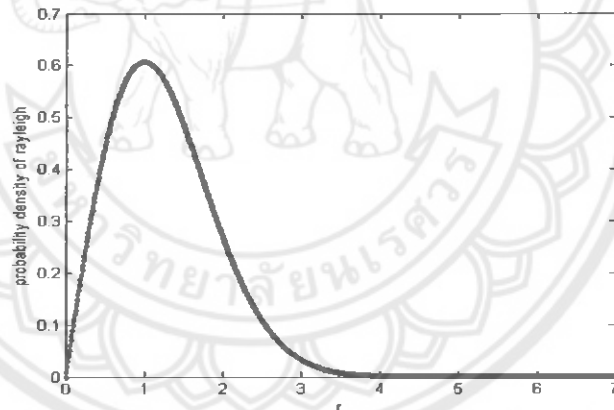
จากรูปที่ 3.6 แสดงการลดทอนในความถี่ต่างๆ ในหน่วยเดซิเบลที่เทียบกับระยะทางและเวลาเมื่อการลดทอนนี้คำนวณได้จากสมการ Path loss ที่อยู่ในเงื่อนไข Free Space สำหรับการทดลองเพื่อความสะดวกในการจะศึกษาผลกระทบของสัญญาณ จึงทำการกำหนดระยะทางของตัวรับและตัวส่งสัญญาณให้มีค่าเท่ากับ 15 กิโลเมตรและเลือกใช้ความถี่เท่ากับ 800 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปแบบการส่งสัญญาณที่ถูกกำหนดพารามิเตอร์ไว้แล้ว

3.1.4.3) เวลาหน่วง (Time Delay)

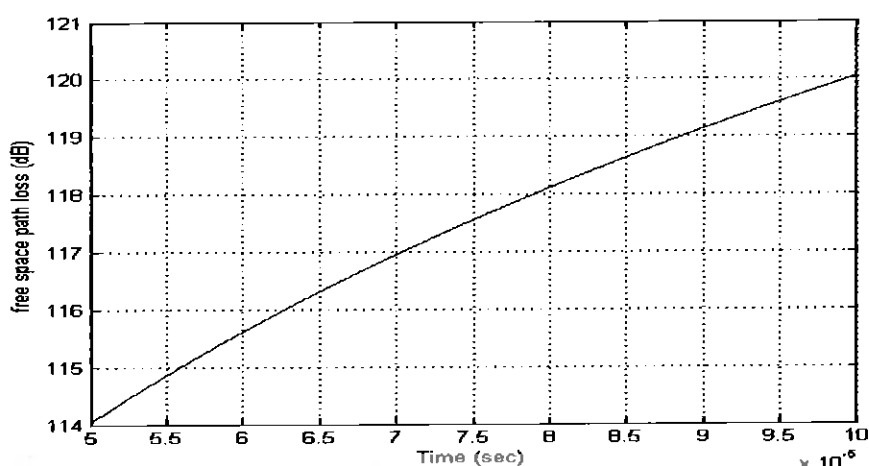
เวลาหน่วงที่เกิดขึ้นจะถูกสมมติมาจากการชนกับสิ่งกีดขวางต่างๆ ที่อยู่โดยรอบเส้นทางที่คลื่นสัญญาณเคลื่อนที่ไป ซึ่งเกิดจากสุมจากฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเรเลย์ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของเรเลย์

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าโอกาสที่มีสูงที่จะเกิดอยู่ในช่วง r เท่ากับ 0 ถึง 4 ซึ่งในการทดลองค่า r นี้จะถูกนำมาเป็นเวลาคู่ที่เกิดขึ้นจากการหน่วง ซึ่งถูกกำหนดไว้ดังนี้ คือ

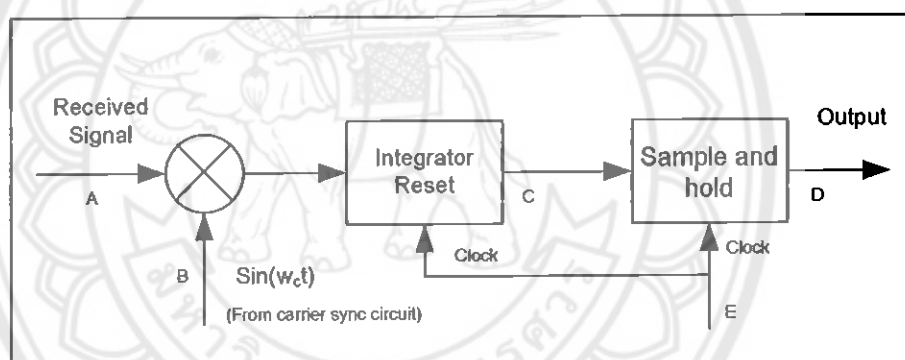
เมื่อสุ่มค่าได้เท่ากับ $r = 1.5$ จะหมายถึงว่าสัญญาณเกิดการหน่วงเวลาขึ้น 15 ไมโครวินาที ซึ่งคำนวณมาจากค่า r คูณกับ 10^{-5} ค่านี้จะนำมาบวกเข้ากับเวลาที่สัญญาณเดินทางไปถึงปลายทางที่เร็วที่สุดคือ 50 ไมโครวินาทีซึ่งจะหมายความว่าสัญญาณนี้ใช้เวลาในการเดินทางทั้งหมดเท่ากับ 65 ไมโครวินาที เป็นต้น ซึ่งเวลาที่ใช้นี้จะนำไปคิดในเรื่องการลดทอนซึ่งได้กล่าวไปในข้างต้นแล้ว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ช่วงเวลาที่ใช้เทียบกับการลดทอนในหน่วยเดซิเบลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงถึงช่วงเวลาที่คลื่นเดินทางเทียบกับการลดทอนที่ความถี่ 800 เมกะเฮิร์ต

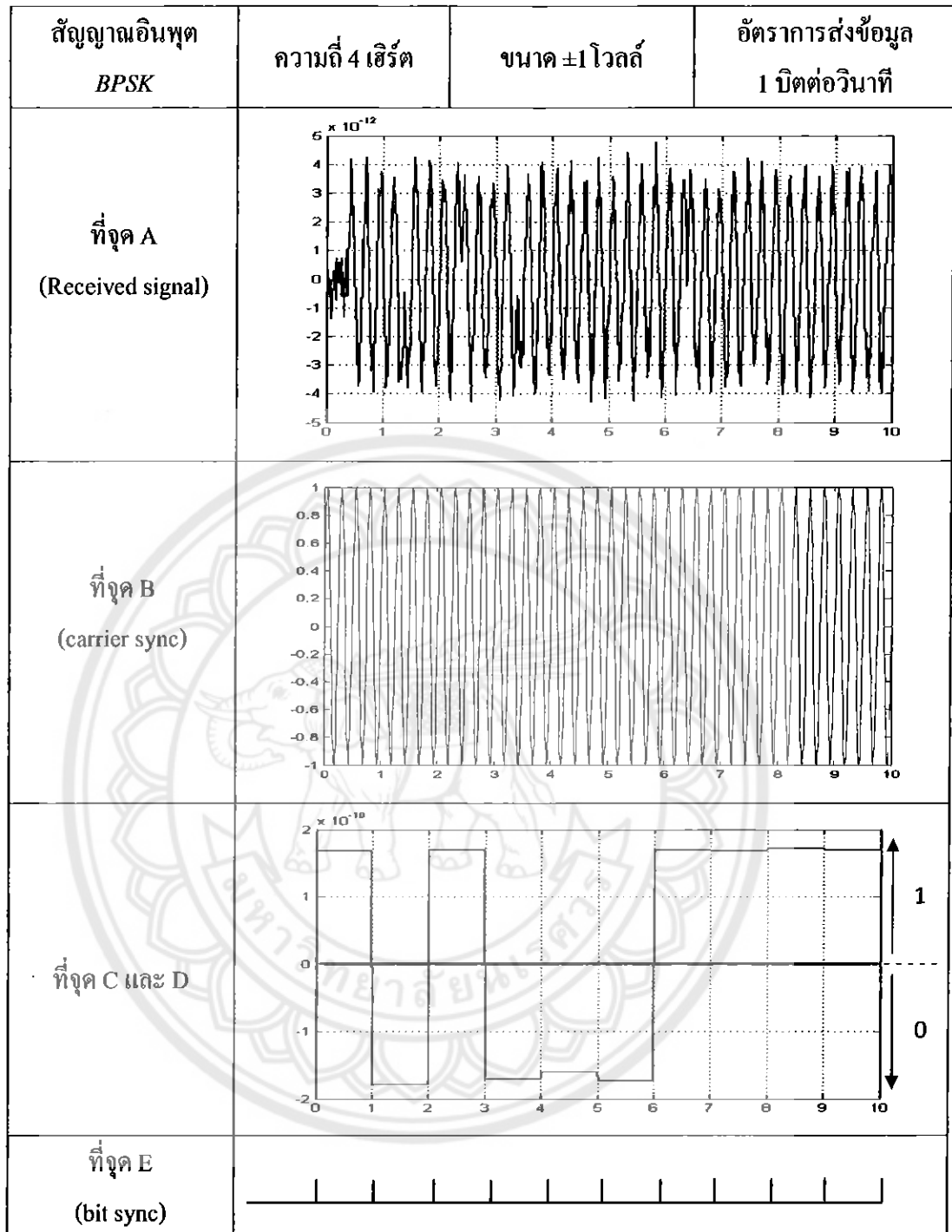
3.1.5) การ Demodulation

การ Demodulation สัญญาณ BPSK นั้น จะใช้วิธี Integral and Dump ดังแสดงผังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพการ demodulation ของสัญญาณ BPSK

จากรูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการ demodulation สำหรับสัญญาณ BPSK สำหรับขั้นตอนแรก Received Signal คือสัญญาณที่ผ่านช่องส่งสัญญาณแล้วสัญญาณจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.11 (จุด A) สัญญาณนี้จะถูกคูณเข้ากับสัญญาณ $\sin(w_c t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับสัญญาณที่ส่งมา (จุด B) ผลลัพธ์ที่ได้คือสัญญาณที่เป็นบวกและลบขึ้นอยู่กับบิตของข้อมูลเพราะเฟสของบิตนั้นมีเฟสต่างกันเท่ากับ 180° สัญญาณนี้จะผ่านเข้าบล็อก Integrator Reset บล็อกนี้มีหน้าที่รวมสัญญาณในเวลา 1 clock และทำการ Reset ข้อมูลแล้วทำการรวมใหม่ต่อไป (จุด C) ต่อไปเข้าสู่บล็อก Sample and hold สัญญาณจะถูกเทียบกับสัญญาณอ้างอิง สัญญาณอ้างอิงในที่นี้จะถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ ดังนั้น สัญญาณจากจุด C ในช่วงเวลา clock นั้นๆ จะถูกตัดสินว่าเป็นบิต 1 เมื่อสัญญาณนั้นมากกว่าสัญญาณอ้างอิง และ บิต 0 เมื่อสัญญาณต่ำกว่าสัญญาณอ้างอิง (จุด D) ส่วนจุด E คือสัญญาณ clock ที่เป็นตัวกำหนดจังหวะของสัญญาณที่สัมพันธ์กับสัญญาณที่เข้ามา



รูปที่ 3.11 แสดงการ Demodulation ของสัญญาณ *BPSK*

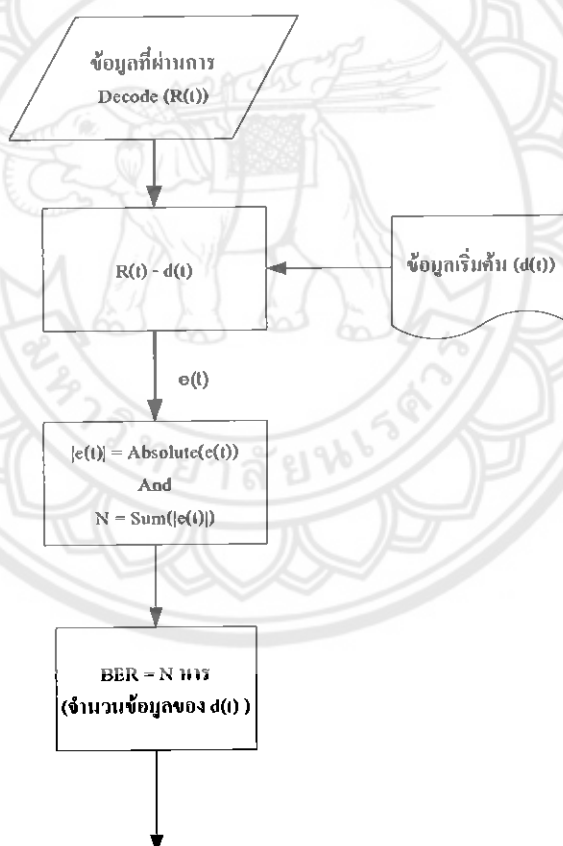
จากรูปที่ 3.11 จุด A เป็นจุดที่ภาครับรับสัญญาณมาจากช่องส่งสัญญาณซึ่งสัญญาณจะถูกคูณเข้ากับสัญญาณพาห้ที่มีความถี่เท่ากัน (จุด B) ผลที่ได้คือจุด C จะเห็นว่าสัญญาณมีส่วนที่เป็นบวกและลบต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งเมื่อทำการนำสัญญาณมาเปรียบเทียบกับที่จุด D แล้ว (การเปรียบเทียบถูกกำหนดไว้ว่าถ้าใน 1 Clock นั้นมีผลรวมมากกว่า 0 แล้วจะตัดสินใจว่าเป็นบิต 1 แต่ถ้าไม่ตัดสินว่าเป็นบิต 0) นำผลไปสู่ในขั้นตอนต่อไป

3.1.6 การถอดรหัสสัญญาณแบบ Convolution code และ interleaf

เมื่อผ่านกระบวนการ Demodulation เรียบร้อยแล้วผลที่ได้ตอนนี้คือ ไบนารีบิตซึ่งต้องนำถอดรหัสกลับเสียก่อนถึงจะนำบิตเหล่านี้ไปตรวจสอบความผิดพลาดจากที่ได้กล่าวไปแล้วความสามารถของการเข้ารหัสชนิดนี้ที่ถูกนำมาใช้จะสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดกันสูงสุดได้สูงสุดจำนวน 3 บิตข้อมูล

3.1.7 การหาค่าอัตราความผิดพลาด (Bit error rate, BER)

ค่าอัตราความผิดพลาดของสัญญาณ ณ ค่า SNR (dB) ใดๆ เป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการทดสอบสมรรถนะของสัญญาณที่ได้ผ่านช่องส่งสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ว่าแต่ละค่า SNR มีค่า BER เท่าไรขั้นตอนการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปข้างล่างต่อไปนี้



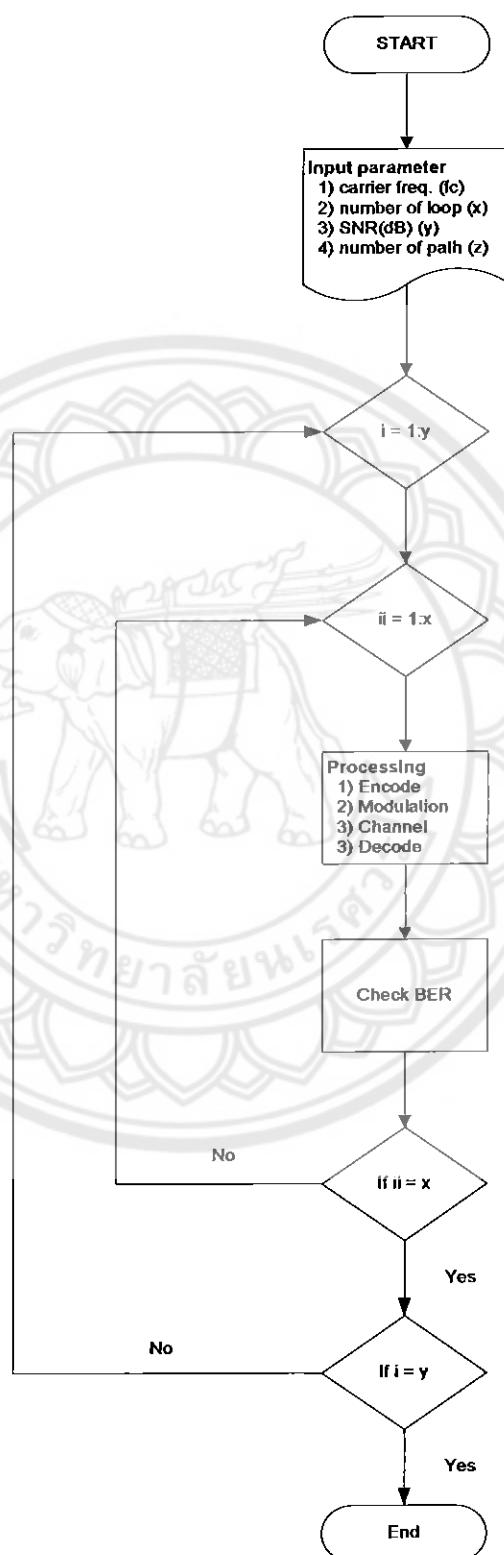
รูปที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการหา BER

จากรูปที่ 3.12 ข้อมูลที่ผ่านการบวนการถอดรหัสเรียบร้อยแล้วทั้ง Convolution Code และ อินเทอร์ลีฟ เรียบร้อยแล้วคือ $R(t)$ ขั้นตอนต่อไปคือนำข้อมูลที่สุ่มมาครั้งแรก $d(t)$ เข้ามาลบกันเพื่อหาความแตกต่าง เช่น $R(t) = [1\ 0\ 1\ 0\ 0]$ และ $d(t) = [1\ 1\ 1\ 0\ 0]$ จะได้ค่า $e(t) = [0\ -1\ 0\ 0\ 0]$ นำมาหาค่าสมบรูณ์จะได้ $|e(t)| = [0\ 1\ 0\ 0\ 0]$ และหาผลรวมของ $|e(t)|$ จะได้ค่า $N = 1$ ซึ่งหมายความว่ามียิตผิดพลาดอยู่ 1 ตัวจากนั้นนำมาหาค่า BER คือการนำค่า N มาหารด้วยจำนวนบิตที่ส่งเข้ามาตั้งแต่เริ่มต้นทั้งหมด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ อัตราความผิดพลาด 1 บิตต่อการส่ง 5 บิต เป็นต้น

จากกระบวนการขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสามารถนำมาสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.13 ขั้นตอนทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังนี้

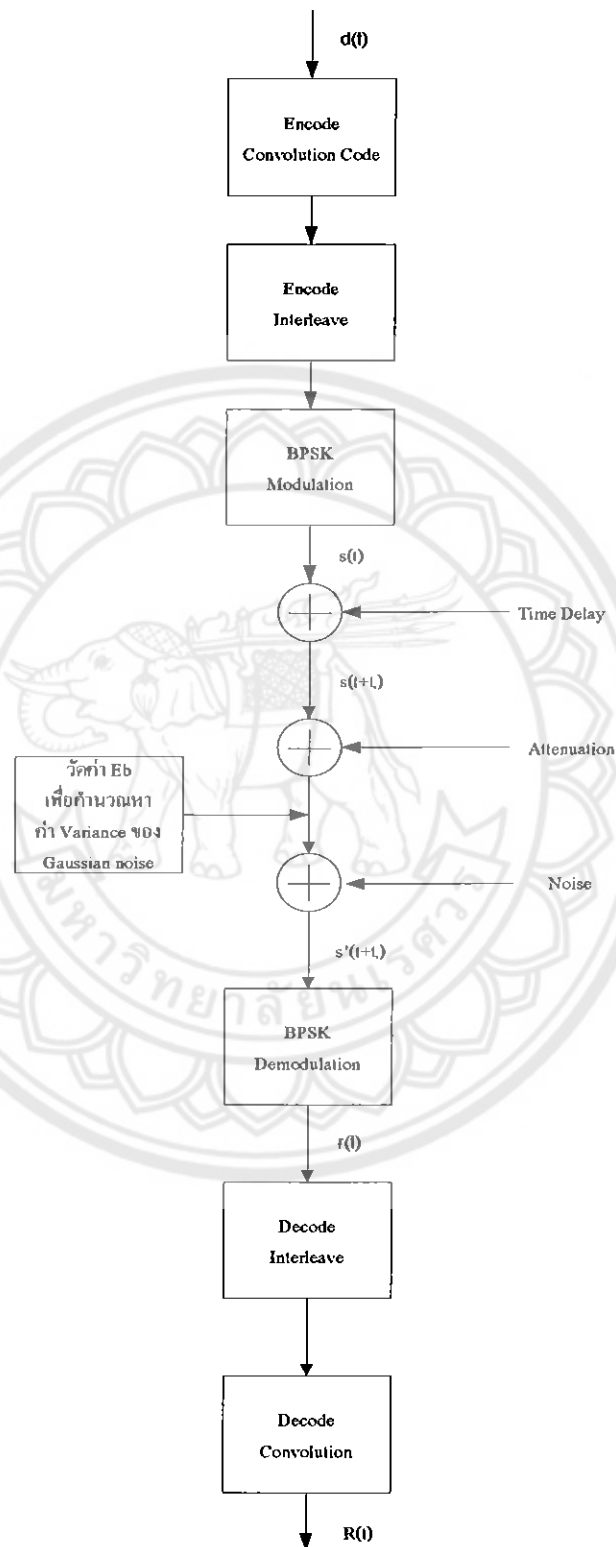
- 1) ขั้นแรกต้องทำการป้อนข้อมูลที่สำคัญอยู่ 4 ตัวแปร คือ ความถี่พาห้ จำนวนรอบ (number of loop, x) SNR (y) และ จำนวนเส้นทาง (number of path, z)
- 2) เมื่อกำหนดตัวแปรครบเรียบร้อยแล้วขั้นต่อไปจะเป็นกระบวนการหาค่า y และ ค่า x หมายความว่าเมื่อโปรแกรมทำงานครบรอบ 1 รอบค่าของตัวแปรนั้นจะบวกขึ้นไปอีก 1 ตัวอย่างเช่นค่า i จะเริ่มต้นที่ 1 เมื่อโปรแกรมทำงานครบ 1 รอบ i จะเท่ากับ 2 จนมีค่าเท่ากับ y ซึ่งเป็นค่า SNR ที่กำหนดไว้ เช่น $SNR = 10$ โปรแกรมจะทำงานทั้งหมด 10 รอบ เป็นต้น
- 3) จะไปสู่ขั้นตอนประมวลผลซึ่งก็ค่า ส่วนของเข้ารหัสสัญญาณ (Convolution Code and Interleaf) ส่วนของการกล่าสัญญาณ (Modulation) ส่วนของช่องส่งสัญญาณและสุดท้ายคือการถอดรหัสสัญญาณ (Decode) ซึ่งจะขยายความต่อไปในรูปที่ 3.14
- 4) สุดท้ายการคำนวณหาค่า BER ของสัญญาณซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกอธิบายในรูปที่ 3.12

แผนภาพแสดงการทำงานทั้งหมดของแบบจำลอง



รูปที่ 3.13 แสดงขั้นตอนลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ส่วนของ Processing



รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการทำงานส่วนของ Process

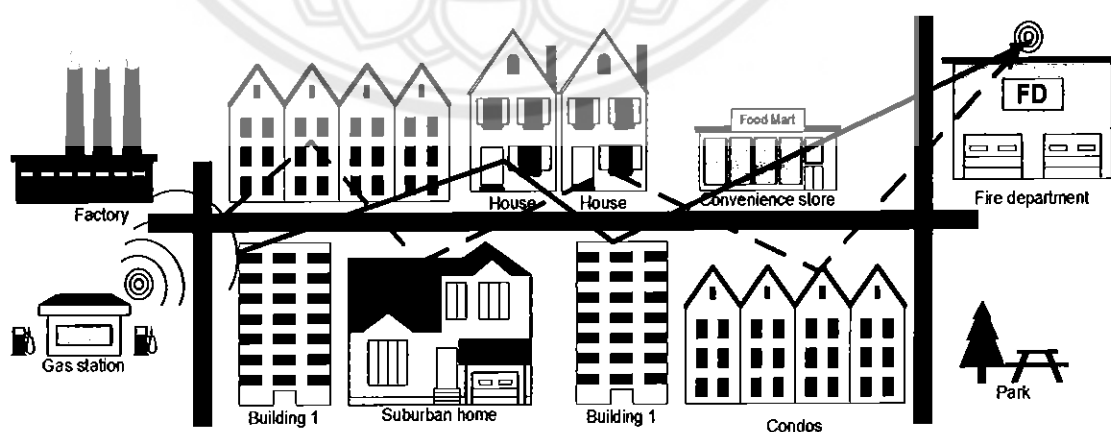
สุดท้ายของขั้นตอนการดำเนินงานจะขออธิบายส่วนของขั้นตอนการประมวลผลเพื่อเพิ่มความเข้าใจในการทำงานดังแผนภาพในรูปที่ 3.14 ดังนี้

เมื่อทำการสุ่มบิตข้อมูลมาคือ $d(i)$ ขั้นตอนต่อไปคือการเข้ารหัส Convolution Code แบบ 1 ออก 2 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดติดกันสูงสุด 3 บิต ผ่านขั้นตอนนี้เข้าสู่ขั้นตอนเข้ารหัสอินเทอร์ลิฟ ขั้นตอนนี้คือการจัดบิตให้เป็นบล็อกๆ โดยในที่นี้จัดให้เป็นบล็อกๆละ 10 บิต จากนั้นจะทำการสลับข้อมูลจากข้อมูลที่เป็นแถวมาเป็นหลักแล้วส่งข้อมูลออกไปเป็นแถวอีกครั้ง วัตถุประสงค์ที่ทำอย่างนี้คือ บิตจะกระจายตัวออกไปเพื่อที่จะกระจายความผิดพลาดแบบหลายบิตที่มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นในช่องส่งสัญญาณ ขั้นตอนต่อมาคือ การกล้ำสัญญาณแบบ BPSK และผ่านช่องส่งสัญญาณโดยมีเวลาหน่วง (Time Delay) การลดทอน (Attenuation) และ สัญญาณรบกวน (Noise) เมื่อผ่านช่องส่งสัญญาณเรียบร้อยแล้วจะทำการถอดรหัสอินเทอร์ลิฟ และ Convolution code และ สู่ขั้นตอนสุดท้ายคือการเก็บค่า อัตราความผิดพลาดของข้อมูล (BER) ดังรูปที่ 3.12

3.2 การออกแบบการทดลอง

การวัดประสิทธิภาพสัญญาณและผลกระทบของช่องส่งสัญญาณแบบ multipath นั้นสามารถแยกกรณีการวิเคราะห์ห่อออกมาเป็น 4 กรณีคือ 1 2 3 และ 4 เส้นทาง ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบทางด้านเวลา และ ด้านความถี่ เพื่อทำการศึกษาผลของสัญญาณ ผลกระทบที่เกิดขึ้น รวมถึงผลของการปรับปรุงสัญญาณโดยการใช้การเข้ารหัสแบบ Convolution Code และอินเทอร์ลิฟว่าสัญญาณที่ได้นั้นมีคุณภาพดีขึ้นเพียงใด

3.2.1 การวิเคราะห์เรื่องของเส้นทาง (Path)



รูปที่ 3.15 แสดงเส้นทางของคลื่นสัญญาณในทิศทางต่างๆ

จากรูป 3.15 สถานการณ์ที่สถานีน้ำมันต้องการแจ้งสถานีดับเพลิงได้สื่อสารผ่านทางอากาศ ซึ่งเส้นทางการสื่อสารนั้นมีดีอยู่หนาแน่น ดังนั้น คลื่นสัญญาณที่ถูกแพร่กระจายออกไปมีโอกาสที่จะพุ่งไปชนกันตึกต่างๆเหล่านี้ เมื่อภาครับสัญญาณในเวลาใกล้เคียงกันนั้นก็จะเกิดสัญญาณที่ถูกส่งออกมาซ้อนทับกันตามจำนวนคลื่นสัญญาณ ได้ถูกสะท้อนเข้าไปในทิศทางนั้นๆ

สำหรับการทดลองจะสมมติกรณีการเกิดเส้นทางต่างๆ ทั้งหมด 4 กรณี คือ 1 2 3 และ 4 เส้นทาง ยกตัวอย่างเช่น ถ้ากรณีของ 2 เส้นทาง ก็จะทำการสุ่มค่าหน่วยเวลาออกเป็น 2 ค่าแล้วนำค่าทั้งสองผ่านช่องส่งสัญญาณตามปกติจากนั้นก่อนถึงสัญญาณรบกวนก็จะทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกันแล้วบวกสัญญาณรบกวนขั้นตอนต่อไปก็ปฏิบัติตามขั้นตอนข้างต้น

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะเน้นเฉพาะขั้นตอนของการกระบวนการทำงานในปริภูมิตวินนัลเลมนี่ สิ่งที่สำคัญที่ต้องให้ความสนใจคือ ค่า E_b/N_0 หรือ *SNR per bit* ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่โยงไปถึงการวิเคราะห์ผลของ BER ในช่องส่งสัญญาณที่อยู่จำลองขึ้นมาและจะถูกอธิบายในบทที่ 4

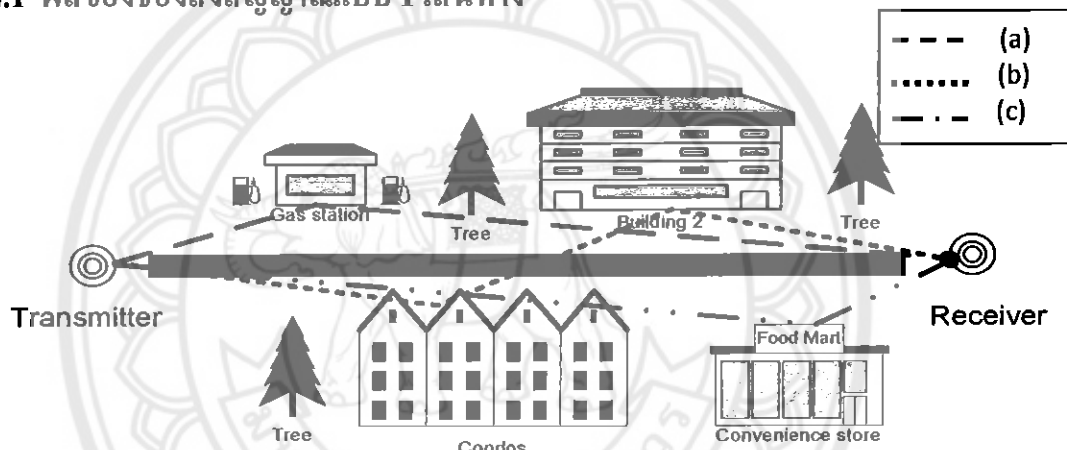


บทที่ 4

ผลการดำเนินโครงการ

จากบทที่ 3 ได้แสดงการอธิบายวิธีการของการทดลองและทดสอบค่า bit-error-rate (BER) แล้ว ดังนั้นสำหรับบทนี้จะแสดงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ Multipath ในทางเวลาและความถี่เพื่อหาค่า BER แต่ละช่องส่งสัญญาณ สำหรับค่า BER และจะทำการเพิ่มเติมในส่วนของการเข้ารหัสแบบ Convolution Code และ การนำกระบวนการอินเทอร์ลีฟใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณ

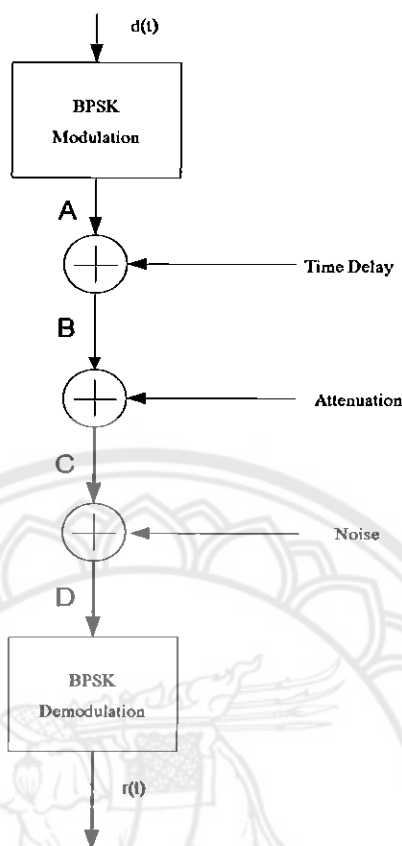
4.1 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง



รูปที่ 4.1 แสดงเส้นทางของคลื่น

ช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทางนั้นหมายถึง สัญญาณมีเพียงเส้นเดียวเท่านั้นที่เดินทางไปถึงภาครับ จากรูปที่ 4.1 อาจกล่าวได้ว่ามีสัญญาณที่เดินทางอาจจะเป็นเส้น a b หรือ c เส้นใดเส้นหนึ่งเท่านั้นเดินทางไปถึงภาครับ ซึ่งลำดับขั้นตอนของการทำการทดลองมีดังนี้

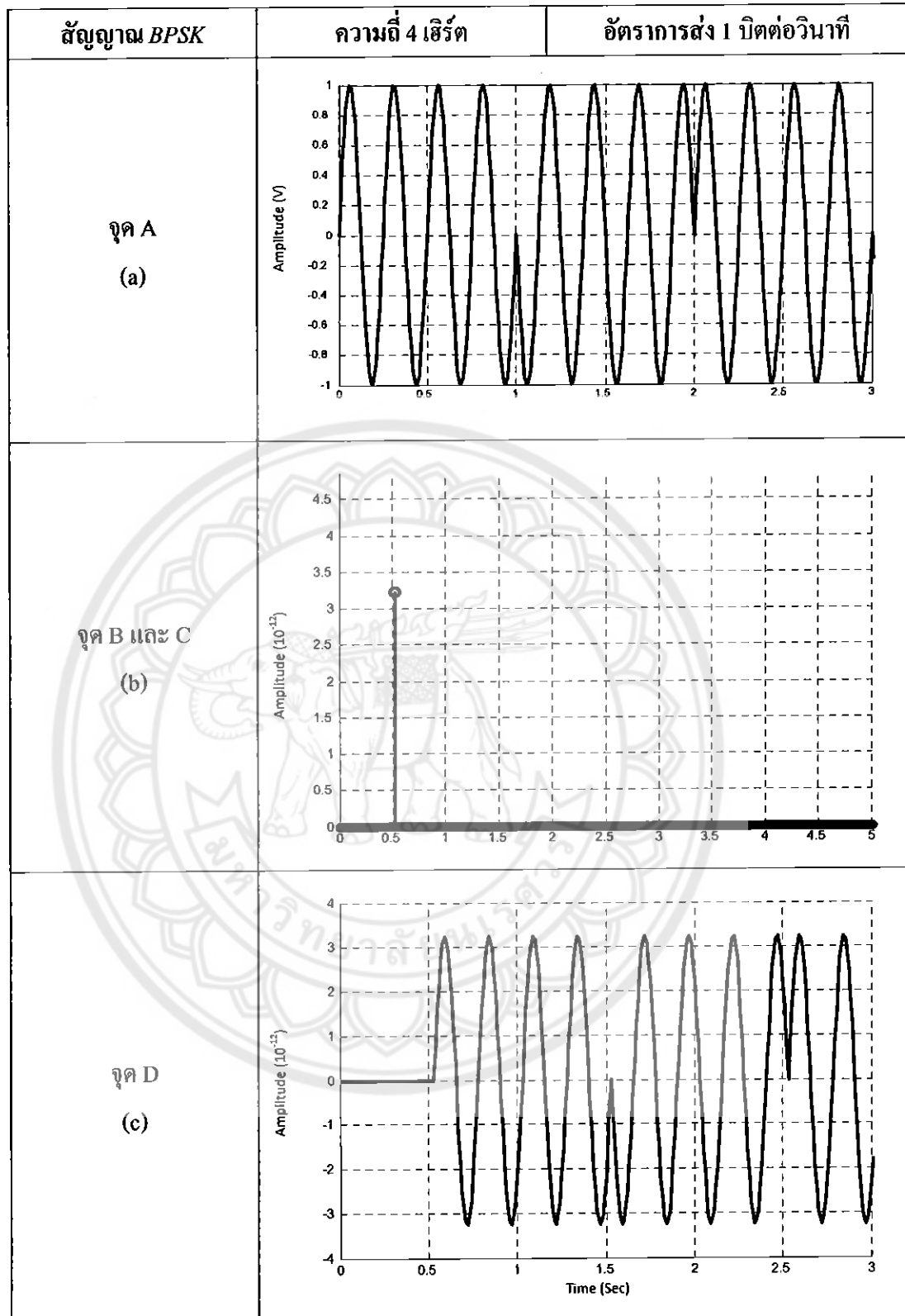
สำหรับภาพที่ 4.2 กล่าวคือ เมื่อสัญญาณได้ถูกส่งออกไปจากภาคส่ง (transmitter) โดยการกล่าสัญญาณแบบ BPSK (จุด A) สัญญาณจะแพร่กระจายไปยังทิศทางต่างๆดังภาพที่ 4.1 แต่ละเส้นทางคลื่นจะใช้เวลาเดินทางไม่เท่ากันทำให้เวลาหน่วงที่แตกต่างกัน (จุด B) และการลดทอนขึ้นที่เกิดจากระยะทางที่สัญญาณเดินทางโดยใช้สมการ 2.18 (สมการ Path loss) ในบทที่ 2 (จุด C) และผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (จุด D) และจากนั้นสัญญาณจะถึงภาครับและผ่านกระบวนการ Demodulation ต่อไปเพื่อคำนวณหาค่า BER ต่อไป



รูป 4.2 แสดงลำดับขั้นตอนในการทดลอง

ลำดับต่อไปจะเป็นตัวอย่างที่จะแสดงให้เห็นตามลำดับขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นทั้งในทางเวลาและความถี่ ซึ่งอย่างที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นสำหรับช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทางนั้นจะมีเพียงสัญญาณเดียวเท่านั้นที่เดินทางไปถึงภาครับได้ และการหน่วงเวลาจะเกิดเพียงค่าเดียวเท่านั้น ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

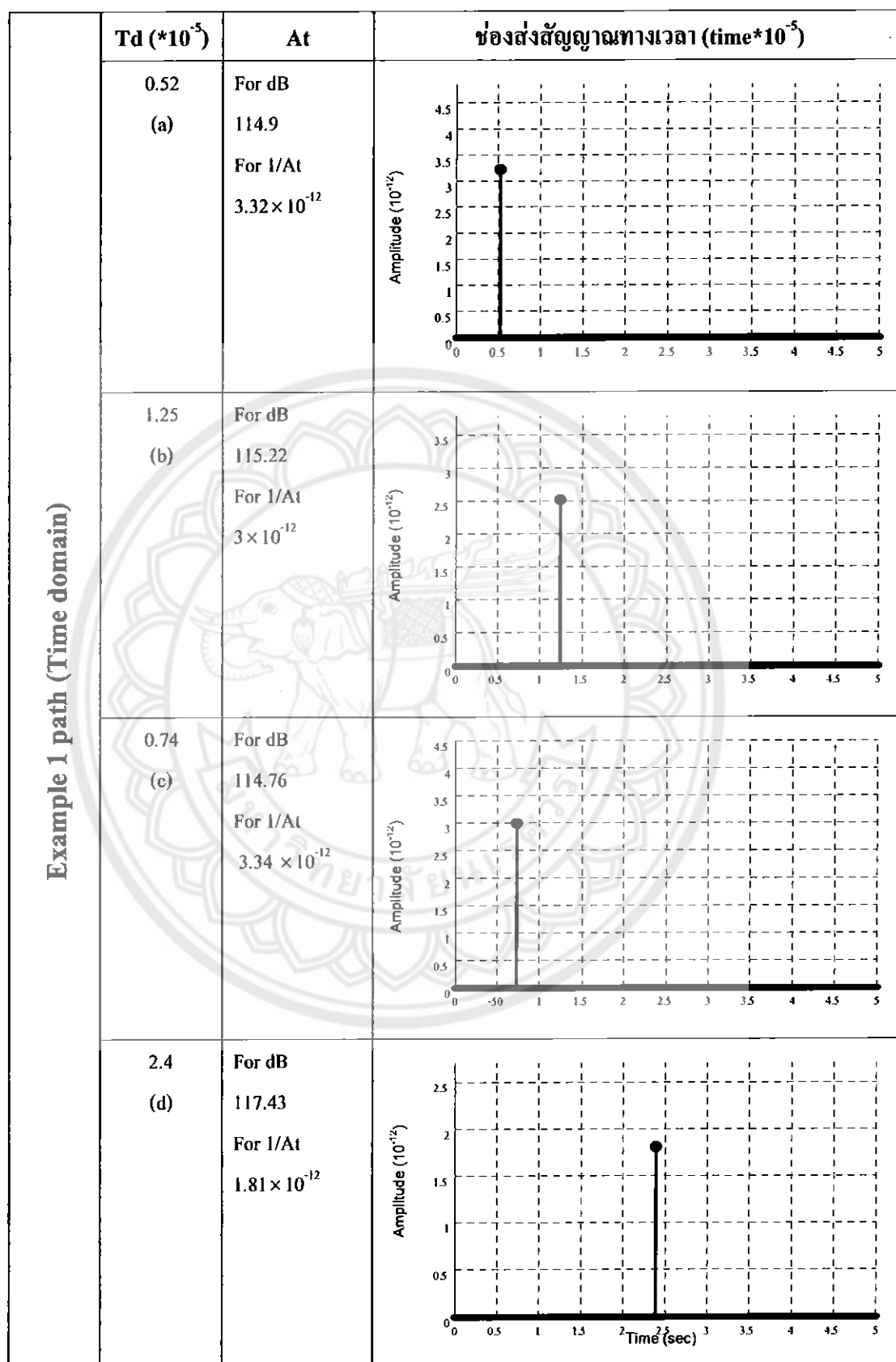
จากรูปที่ 4.3 สมมติว่าสัญญาณที่จะนำผ่านช่องส่งสัญญาณเป็นสัญญาณ BPSK ที่มีความถี่พาห์เท่ากับ 4 เฮิร์ต (จุด A) เมื่อผ่านช่องส่งสัญญาณสัญญาณเกิดเวลาหน่วงขึ้นเท่ากับ 5.2 ไมโครวินาที โดยมีค่าการลดทอนเท่ากับ 114.9 dB หรือ 3.32×10^{-12} (คิดจาก $1/10^{(114.9/10)}$) และที่จุด C เป็นสัญญาณก่อนรวมกับสัญญาณรบกวนนั้นจะเห็นว่าสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปร่างแม้แต่น้อยมีแต่เวลาที่ถูกละหน่วงและการลดทอนที่ลดขนาดของสัญญาณไปเท่านั้น ซึ่งให้สังเกตจากตัวอย่างการทดลองถัดไป



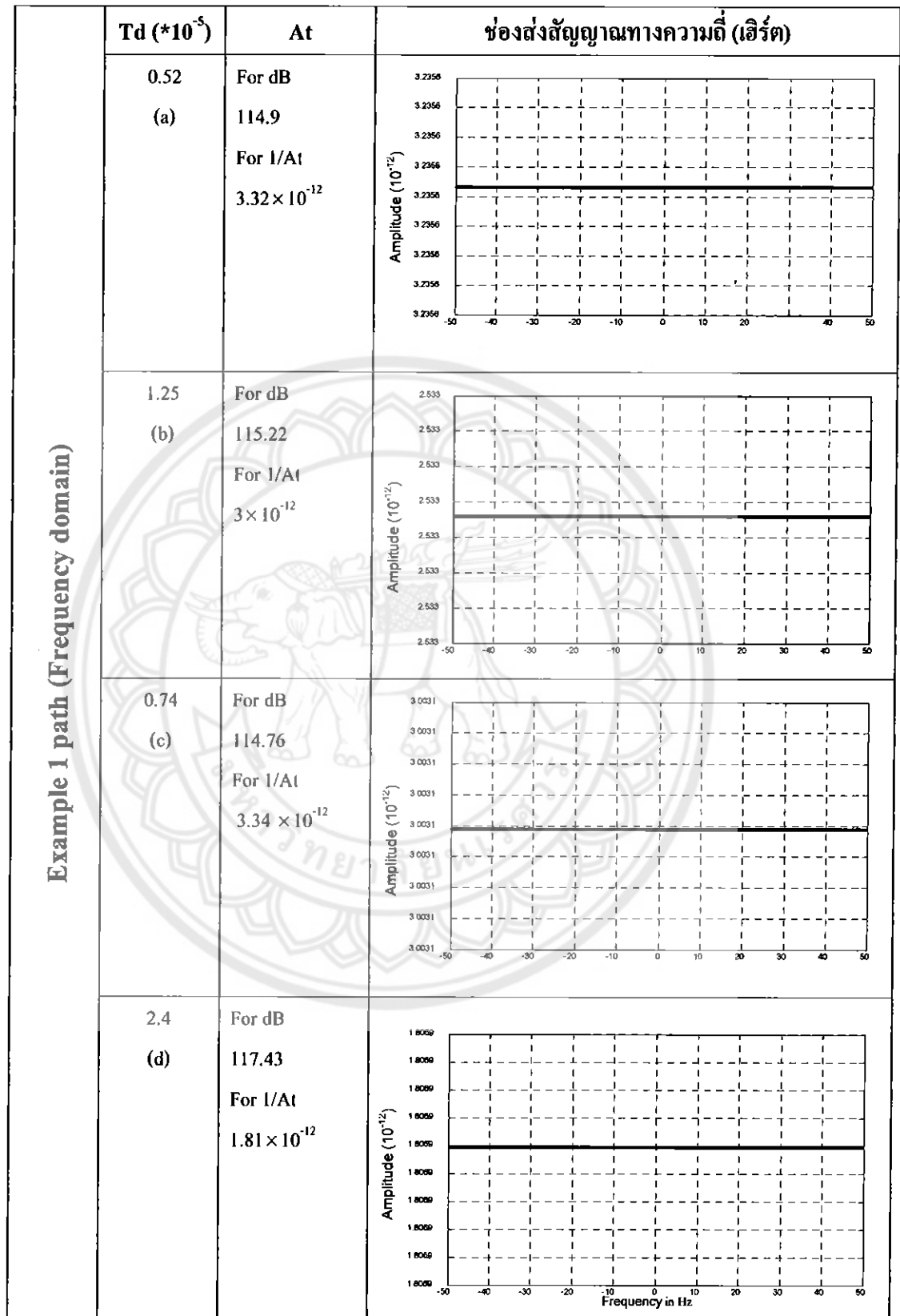
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างสัญญาณ BPSK ที่ ผ่านช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง

At ย่อมาจาก การลดทอน (Attenuation)

Td ย่อมาจาก เวลาหน่วง (Time Delay)



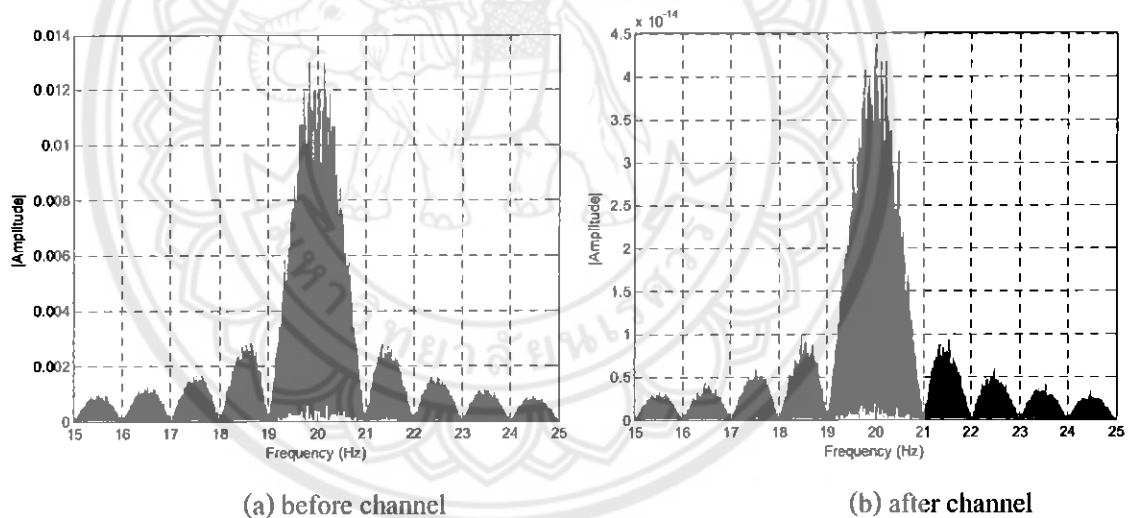
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอนแบบ 1 เส้นทาง



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 1 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่

จากรูปที่ 4.4 เป็นตัวอย่างทั้ง 4 ที่ถูกสุ่มเวลาหนึ่งมาจากการหนาแน่นความหนาจะเป็นของเรเลย์ทั้ง 4 ตัวอย่างจะประกอบประกอบด้วยเวลาหนึ่ง และสัญญาณรบกวนที่สัมพันธ์กับเวลาหนึ่ง ซึ่งรูปทางด้านขวาของรูปที่ 4.4 จะแสดงถึงคุณสมบัติของช่องส่งสัญญาณนั้นๆตามเวลาหนึ่ง เช่น รูป 4.4 (a) มีเวลาหนึ่งเท่ากับ 5.2 ไมโครวินาที ซึ่งมีค่าการลดทอนเท่ากับ 114.9 dB หรือ มีค่าส่วนกลับเท่ากับ 3.32×10^{-12} (คิดมาจาก $1/10^{(114.9/10)}$) และค่านี้เองจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของช่องส่งสัญญาณที่มีเวลาหนึ่งเท่ากับ 5.2 ไมโครวินาที ซึ่งหมายความว่าถ้ามีสัญญาณที่ผ่านเข้ามาในช่องส่งสัญญาณนี้จะถูกการลดทอนเท่ากับ 114.9 dB หรือ สามารถนำมาคูณกับ 3.32×10^{-12} และอีก 3 ตัวอย่างที่เหลือก็สามารถคิดได้เช่นเดียวกับที่กล่าวมา

จากรูปที่ 4.5 เป็นการวิเคราะห์สัญญาณในทางความถี่ซึ่งเวลาหนึ่งนั้นได้นำมาจากรูปที่ 4.4 สังเกตได้ว่าช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทางนั้นสัญญาณทางความถี่จะมีลักษณะที่ราบเรียบ ซึ่งหมายความว่าสัญญาณทางความถี่ที่ผ่านเข้าไปในช่องส่งสัญญาณนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงแค่ค่าขนาดเท่านั้น ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงสัญญาณ BPSK ที่ส่งผ่านช่องส่งสัญญาณที่มีเวลาหนึ่งเท่ากับ 5.2 ไมโครวินาที ดังนี้

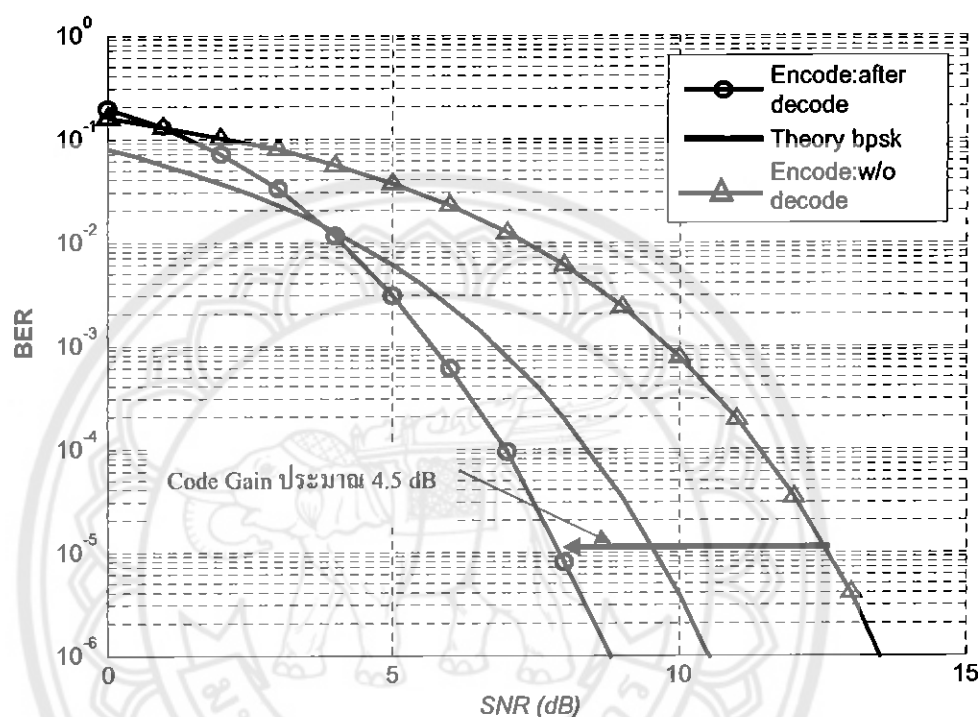


รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณ BPSK ก่อนผ่านช่องส่งสัญญาณและสัญญาณหลังจากผ่านช่องส่งสัญญาณ

จากรูป 4.6 a คือสัญญาณ BPSK ก่อนผ่านช่องส่งสัญญาณ ส่วนรูปขวามือรูปที่ 4.6 b เป็นสัญญาณที่ผ่านช่องส่งสัญญาณ ซึ่งในรูปนี้ลักษณะของสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงแต่ขนาดของสัญญาณมีค่าลดลงเท่านั้นก็เพราะลักษณะของช่องส่งสัญญาณที่ราบเรียบจากที่ได้กล่าวมาแล้ว

การทดสอบค่า BER ในช่องส่งสัญญาณ 1 เส้นทาง

ผลการทดสอบสัญญาณในช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทางโดยการนำสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณสำหรับกรณีนี้ไม่ว่าสัญญาณจะผ่านช่องส่งสัญญาณที่มีเวลาหน่วงเท่ากับเท่าไรผลของช่องส่งสัญญาณกับค่า BER จะมีค่าเท่ากันเสมอเพราะว่าช่องส่งสัญญาณมีลักษณะราบเรียบเหมือนกันในทุกกรณีในเวลาหน่วงต่างๆดังภาพที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง

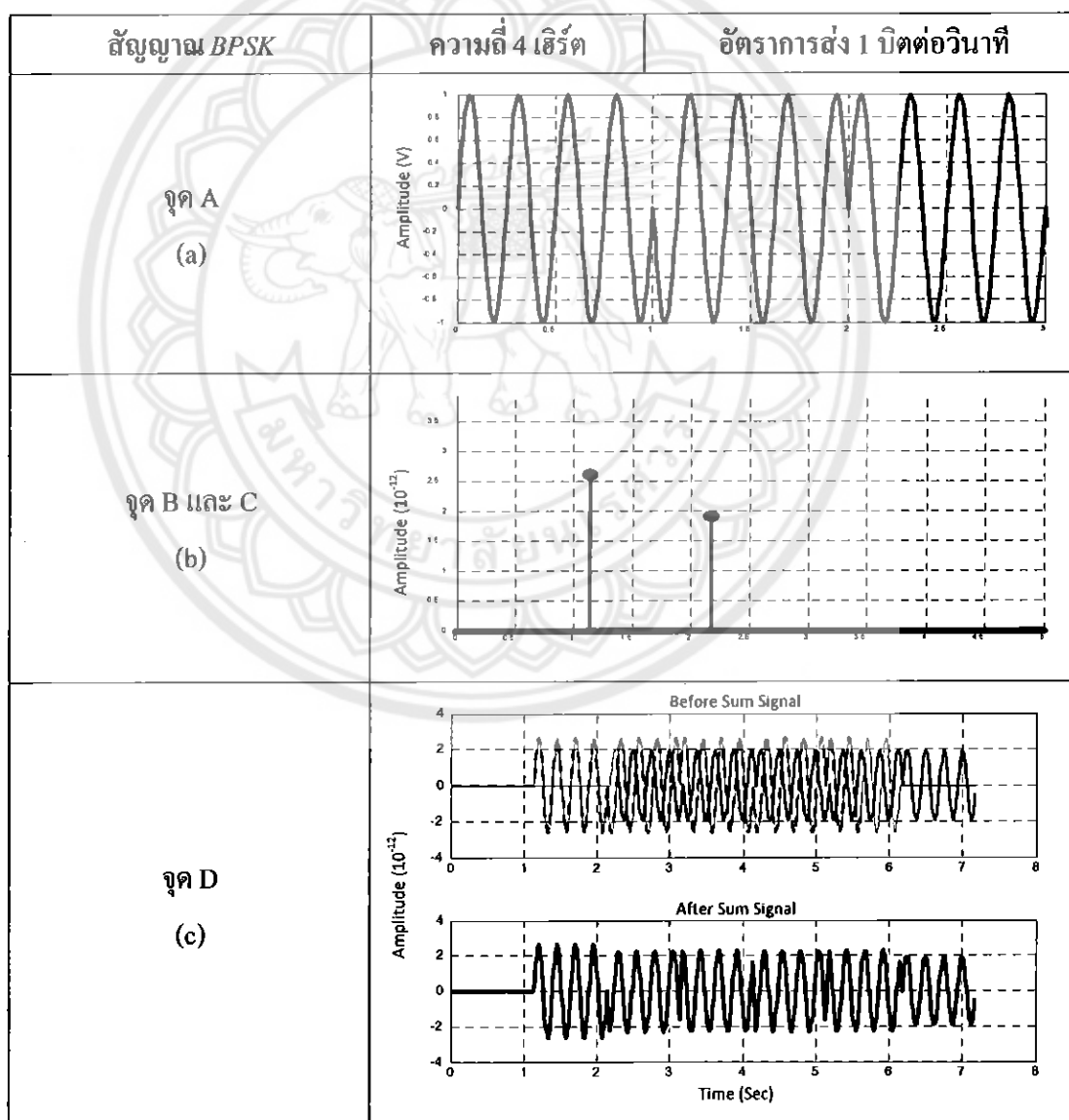
จากรูปที่ 4.7 เส้นกราฟ BER ทางทฤษฎีของสัญญาณ BPSK ที่ถูกส่งผ่านช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง และเมื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ารหัส Convolution Code แบบ Hard-Decision $R = 1/2$ และ $K = 5$ แล้วมีผลทำให้กราฟ BER ดีขึ้นเพราะว่าการเข้ารหัสนี้จะสามารถแก้ไขผิดพลาด 3 บิตแบบติดต่อกันได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟทางทฤษฎีและกราฟที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว ที่ $BER = 10^{-5}$ สัญญาณที่เข้ารหัสจะมีค่า SNR ที่ดีกว่าถึง 4.5 dB ซึ่งหมายความว่าในการส่งพลังงานที่น้อยกว่าแต่ประสิทธิภาพที่เท่ากัน ดังนั้นการเข้ารหัสสามารถช่วยในเรื่องพลังงานในการส่งที่ลดลงได้

ส่วนกราฟที่ไม่ได้ทำการ decode จากรูป 4.7 เป็นสัญญาณที่มีการเข้ารหัสแต่แตกต่างกันที่สัญญาณไม่ได้ผ่านการถอดรหัส ผลที่ได้ที่นั่นมีค่า BER ที่แย่กว่าสัญญาณทางทฤษฎี ที่ไม่ได้เข้ารหัสประมาณ 3 dB ที่ $BER = 10^{-5}$ เพราะค่าพลังงานเฉลี่ยต่อบิต (E_b) ของกราฟที่ไม่ได้ถอดรหัสนั้นมีค่าน้อยกว่าการส่ง BPSK ปกติครั้งหนึ่ง ดังนั้นสรุปว่าประสิทธิภาพในการเข้ารหัสครั้ง

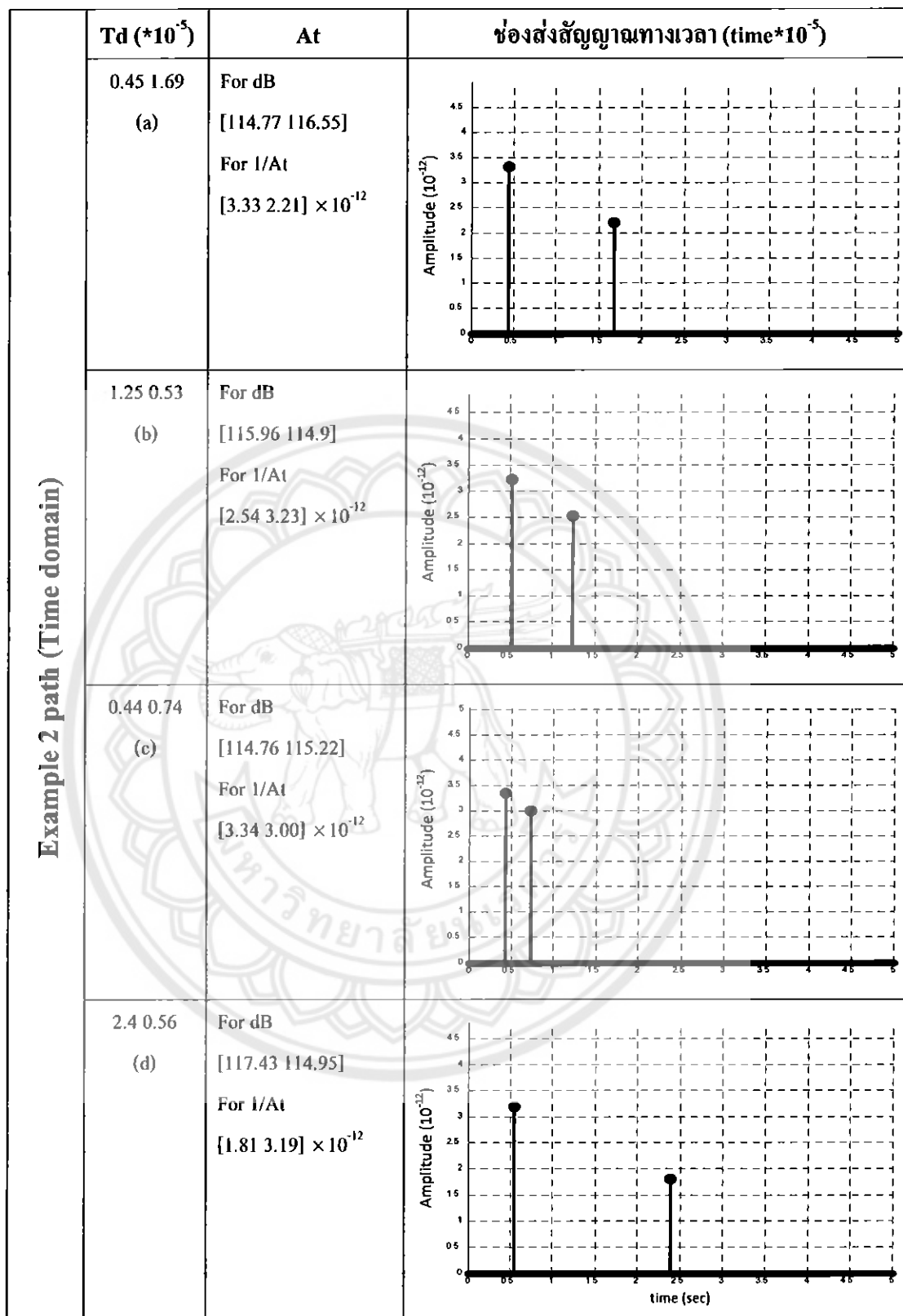
นี้มีค่า Code Gain ประมาณ 4.5 dB ซึ่งเมื่อสังเกตที่ $BER = 10^{-5}$ สัญญาณมีคุณภาพดีขึ้นจากสัญญาณในทางทฤษฎี

4.2 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง

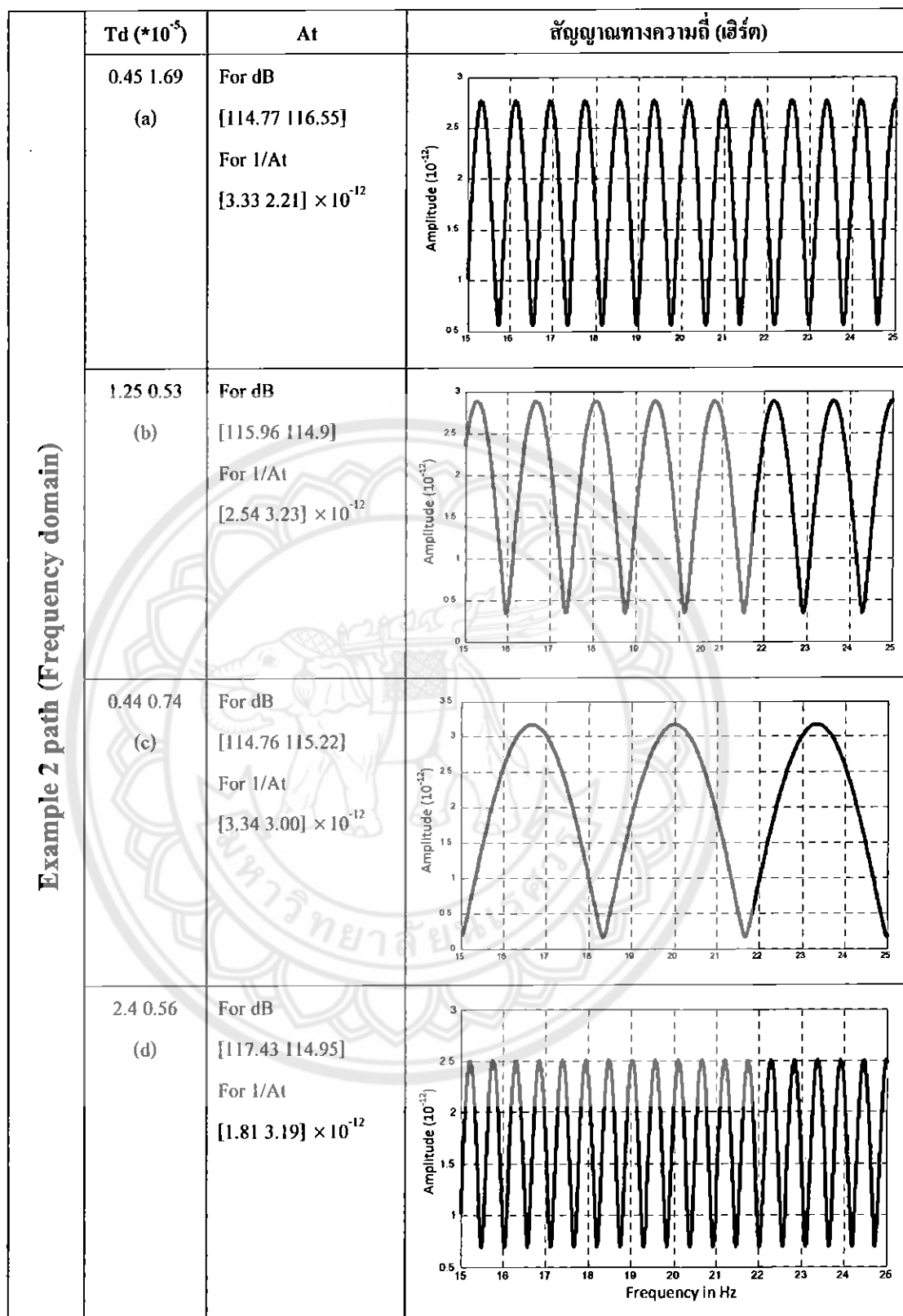
ช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทางหมายถึง ช่องส่งสัญญาณที่เกิดจากสัญญาณเดินทางเข้ามายังภาครับ 2 สัญญาณ ในเวลาใกล้เคียงกันซึ่งส่งผลให้เกิดเวลาหน่วง 2 ค่าและสัญญาณทั้งสองจะเกิดการซ้อนทับกันเกิดขึ้นตัวอย่างเช่น ถ้าสังเกตจากรูปที่ 4.1 นั้น สัญญาณในเส้นทั้งสามเส้นทางต้องมี 2 เส้นทางที่เดินทางมาถึงยังภาครับเป็นต้น จากรูปที่ 4.8 ข้างล่างนี้จะเป็นตัวอย่างที่เกิดจากช่องสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างสัญญาณที่ ผ่านช่องส่งสัญญาณและแสดงการรวมกันของสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอน แบบ 2 เส้นทาง



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 2 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่

การทดสอบค่า BER ในช่องส่งสัญญาณ 2 เส้นทาง

ผลการทดสอบสัญญาณในช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทางโดยการนำสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณเมื่อทำการวิเคราะห์ช่องส่งสัญญาณทางเวลานั้นมีความสัมพันธ์กับช่องส่งสัญญาณทางความถี่ดังนี้

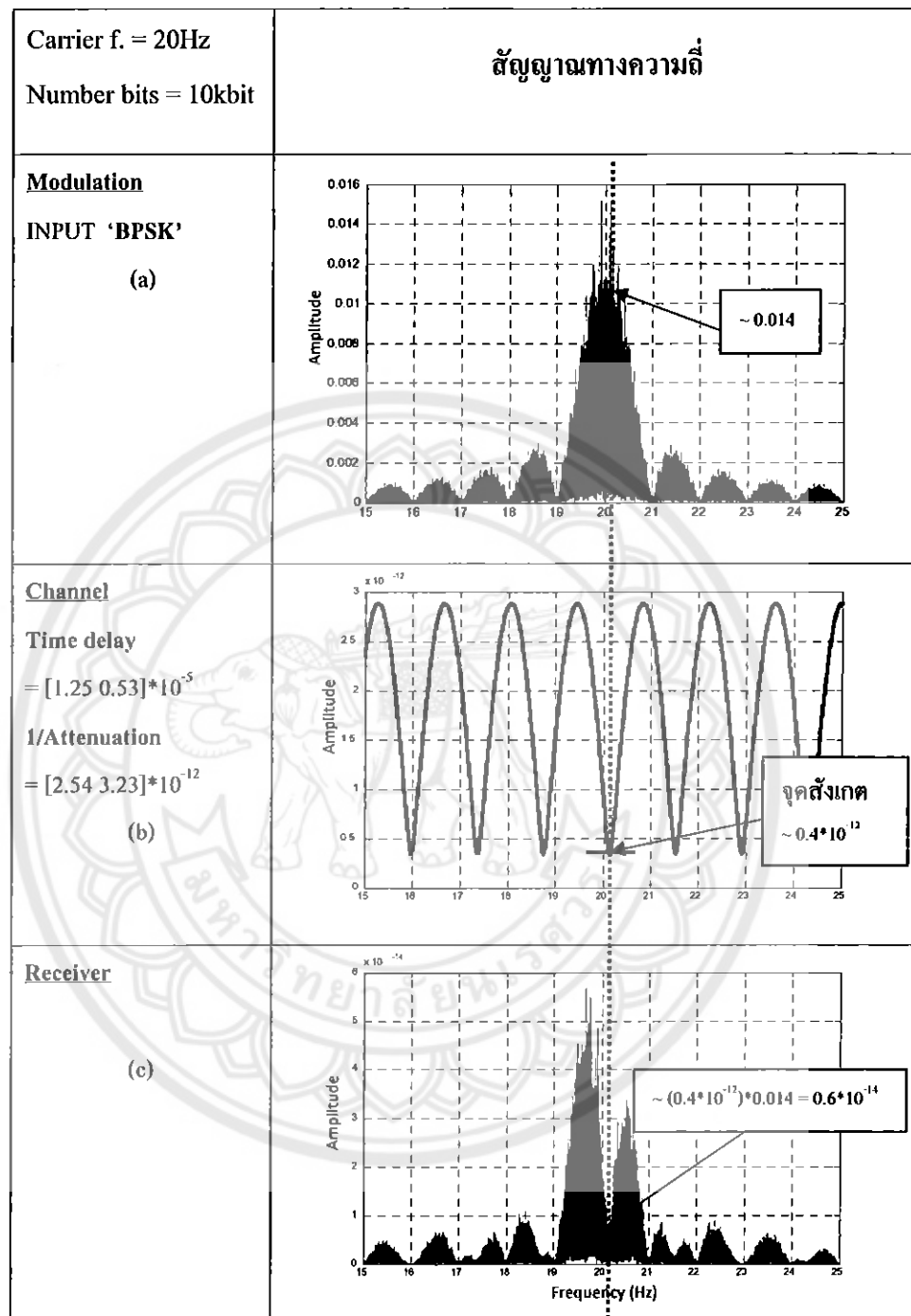
1) เมื่อเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นมีเวลาหน่วงที่ใกล้เคียงกันจะส่งผลให้ช่องส่งสัญญาณทางความถี่มีลักษณะกว้างกว่ากรณีที่เวลาหน่วงที่เกิดขึ้นมีเวลาหน่วงที่ห่างกันมากกว่า จากรูปที่ 4.9 c เปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.9 d เวลาหน่วงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันส่งผลต่อช่องสัญญาณทางความถี่อย่างเห็นได้ชัดในรูปที่ 4.10 c และ 4.10 d

2) จากข้อที่ 1 เมื่อผลตอบแทนทางความถี่ที่แตกต่างกันทำให้สัญญาณที่ผ่านช่องส่งสัญญาณนั้นย่อมแตกต่างกันด้วย เช่น สมมติว่าส่งสัญญาณ BPSK ที่มีความถี่พาห์เท่ากับ 20 เฮิร์ต ข้อมูลของสัญญาณจะย้ายความถี่มาอยู่ที่ 20 เฮิร์ต เมื่อนำสัญญาณส่งผ่านช่องส่งสัญญาณในรูปที่ 4.10 c ช่องส่งสัญญาณมีลักษณะที่สัญญาณจะสามารถส่งผ่านได้อย่างสะดวกและคุณภาพย่อมน่าจะเป็นดีกว่าช่องส่งสัญญาณในรูปที่ 4.10 d เพราะว่าการลดทอนลงหลายส่วนในช่วงความถี่ที่สัญญาณถูกส่งไป

3) จากสัญญาณในข้อที่ 2 ที่มีความถี่พาห์เท่ากับ 20 เฮิร์ต กรณีที่เลวร้ายที่สุดในช่องส่งสัญญาณที่ได้ยกตัวอย่างมานั้นคือ ในรูปที่ 4.10 b เพราะว่าการลดทอนสูงสุดบริเวณความถี่สัญญาณได้ถูกส่งเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากรูป (a) จะเห็นว่าสัญญาณ BPSK นั้นถูกกล้ำสัญญาณให้มีความถี่อยู่ที่ 20 เฮิร์ต ผ่านช่องส่งสัญญาณในรูป (b) จากเส้นสีเหลืองแสดงจุดที่สัญญาณถูกลดทอนโดยช่องส่งสัญญาณทำให้สัญญาณที่ภาครับรับได้ในรูป (c) มีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ และสามารถสันนิษฐานได้ว่าข้อมูลที่ได้รับมานั้นน่าจะเกิดความเสียหายได้

จากที่ได้ทราบถึงช่องส่งสัญญาณที่ได้กล่าวมาดังตัวอย่าง ขั้นตอนต่อไปคือการหาค่า BER ของช่องส่งสัญญาณทั้ง 4 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.12

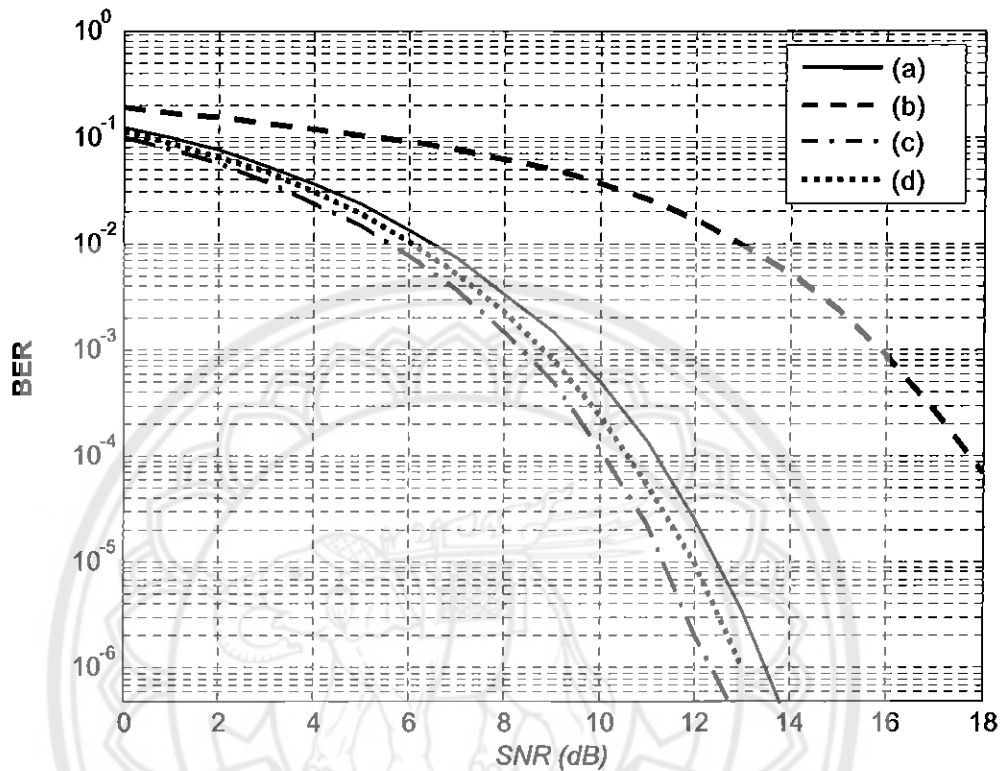
ตัวอย่างแสดงการลดทอนของช่องส่งสัญญาณ



รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณทางความถี่ที่ถูกส่งผ่านช่องส่งสัญญาณ

การทดสอบค่า BER ในช่องส่งสัญญาณ 2 เส้นทาง (Picture in 4.9 and 4.10)

จากการทดสอบค่า BER ที่ได้ในช่องส่งสัญญาณในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยใช้สัญญาณ $BPSK$ ที่ความถี่พาห์เท่ากับ 20 เฮิร์ต ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง (ก่อนเข้ารหัส)

ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ (โดยอ้างช่องส่งสัญญาณในรูปที่ 4.10)

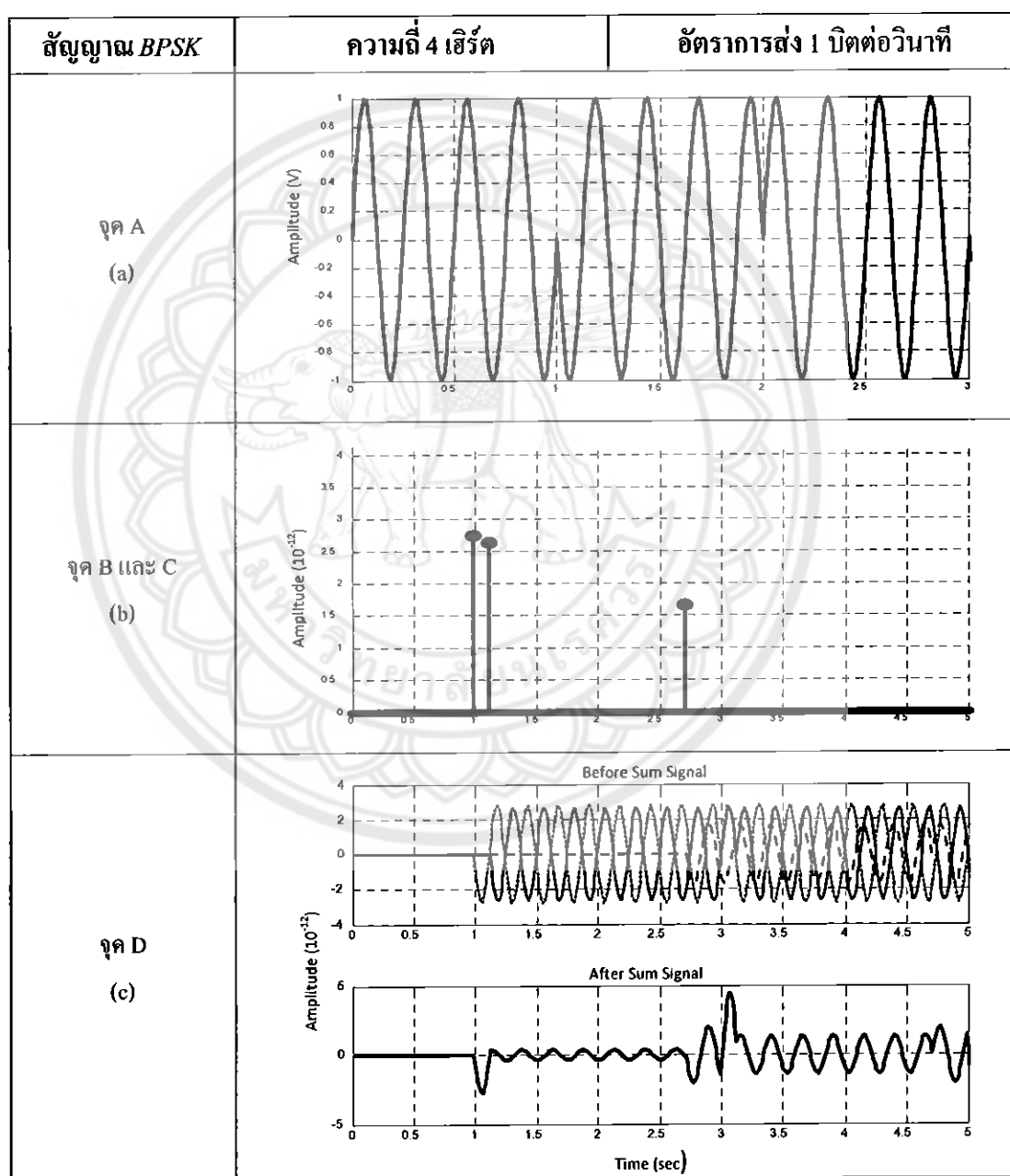
1) จากรูปกราฟเส้น c คือเส้นกราฟที่แสดงค่า BER เทียบกับค่า SNR (dB) สำหรับช่องส่งสัญญาณ c ซึ่งผลการทดลองนั้นมีค่า BER ที่ดีที่สุดที่สุดในตัวอย่างทั้ง 4 เพราะว่าช่องส่งสัญญาณไม่มีการลดทอนในช่วงความถี่ 19-21 เฮิร์ต เลขสัญญาณสามารถส่งผ่านได้อย่างสมบูรณ์

2) เส้นกราฟ b เป็นกราฟ BER ของช่องส่งสัญญาณ b เหตุผลที่ค่า BER มีค่าแย่ที่สุด เพราะว่าในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ต มีการลดทอนอย่างมากส่งผลให้ข้อมูลถูกลดทอนไปด้วยนำไปสู่บิดข้อมูลที่ผิดพลาดมากยิ่งขึ้น

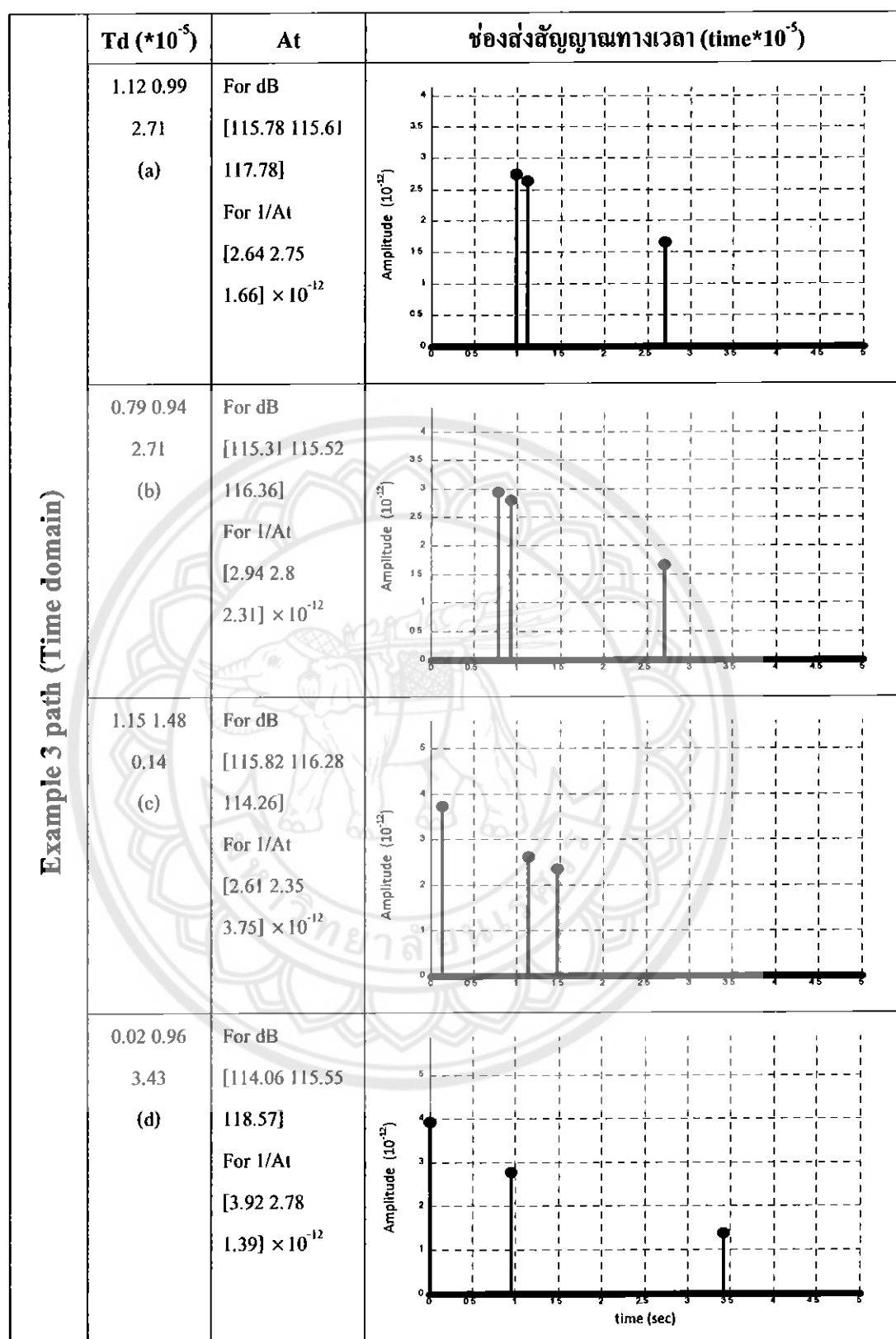
3) ส่วนเส้นกราฟ d และกราฟ a มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันซึ่งค่า BER ก็มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกันแต่ช่องส่งสัญญาณ a มีการลดทอนในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ต มีกว่าช่องส่งสัญญาณ d จึงทำให้ค่า BER ดีกว่าเล็กน้อย

4.3 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 3 เส้นทาง

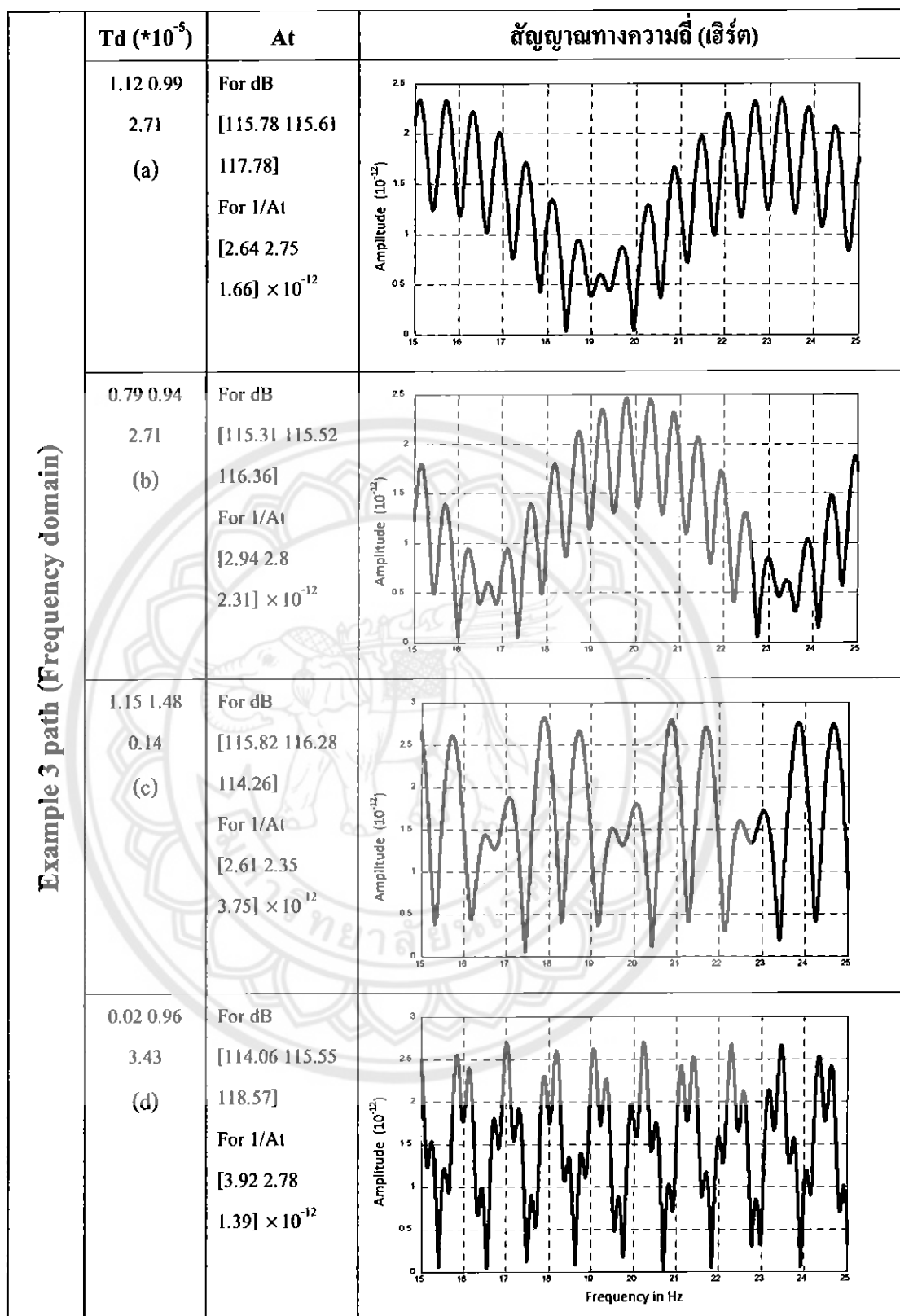
ช่องส่งสัญญาณแบบ 3 เส้นทางนั้นจะมีค่าซับซ้อนมากกว่าแบบ 2 ทาง เพราะว่าสัญญาณที่ภาครับได้รับได้มีถึง 3 สัญญาณดังรูปที่ 4.13 c สัญญาณที่รับได้เมื่อนำมารวมกันสังเกตได้ว่ามีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณที่เริ่มต้นส่งเป็นอย่างมากซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.13 a ดังนั้นในการทดลองเพื่อวัดค่า *BER* จะได้ทำการสุ่มค่าเวลาหน่วง 3 ค่า เป็นทั้งหมด 4 กรณีตัวอย่างดังรูปที่ 4.14 ที่จะขออธิบายต่อไป



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างสัญญาณที่ ผ่านช่องส่งสัญญาณและแสดงการรวมกันของสัญญาณ
แบบ 3 เส้นทาง



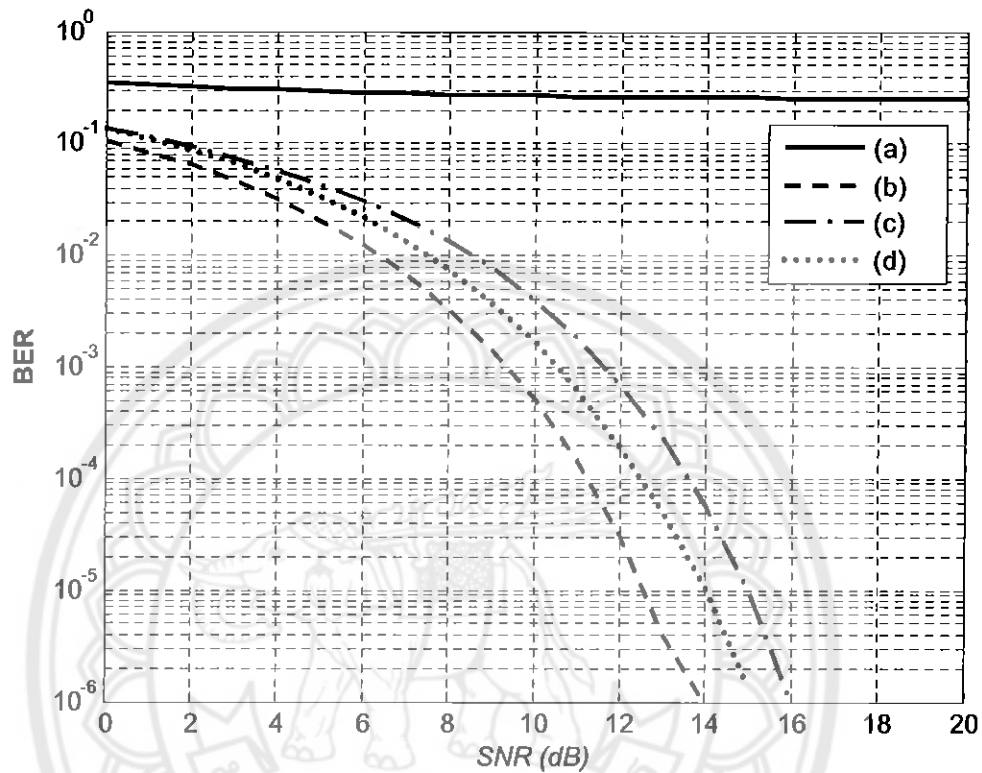
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอนแบบ 3 เส้นทาง



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 3 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่

การทดสอบค่า BER ในช่องส่งสัญญาณ 3 เส้นทาง

ผลจากการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณ a ถึง d ในรูป 4.14 และ 4.15 โดยใช้สัญญาณ BPSK ที่ความถี่พาห์เท่ากับ 20 เฮิร์ต ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 3 เส้นทาง (ก่อนเข้ารหัส)

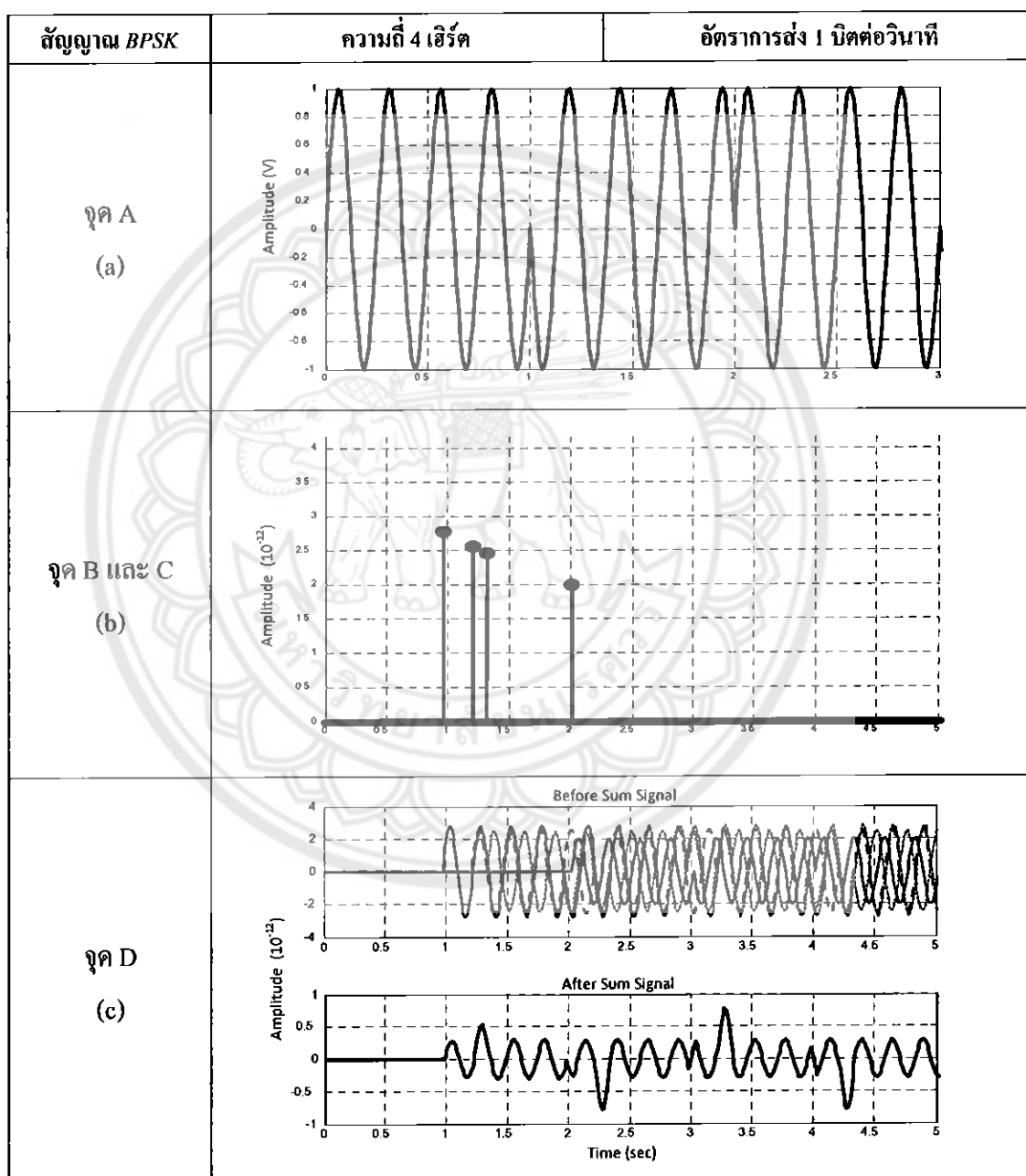
ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ (โดยอ้างช่องส่งสัญญาณในรูปที่ 4.15)

1) ช่องส่งสัญญาณ a ในรูปที่ 4.15 เป็นช่องส่งสัญญาณที่เกิดการลดทอนสูงที่สุดในบริเวณ 20 เฮิร์ต ซึ่งเป็นสัญญาณข้อมูล การลดทอนนี้สูงมากจนบริเวณ 20 เฮิร์ต มีค่าเกือบเท่ากับ 0 แสดงว่าข้อมูลเกือบทั้งหมดน่าจะมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดสูงมาก ซึ่งเมื่อสังเกตจากเส้นกราฟ a ค่า BER ไม่ดีขึ้นแม้ว่าสัญญาณจะมีค่ากำลังที่ส่งสูงขึ้น

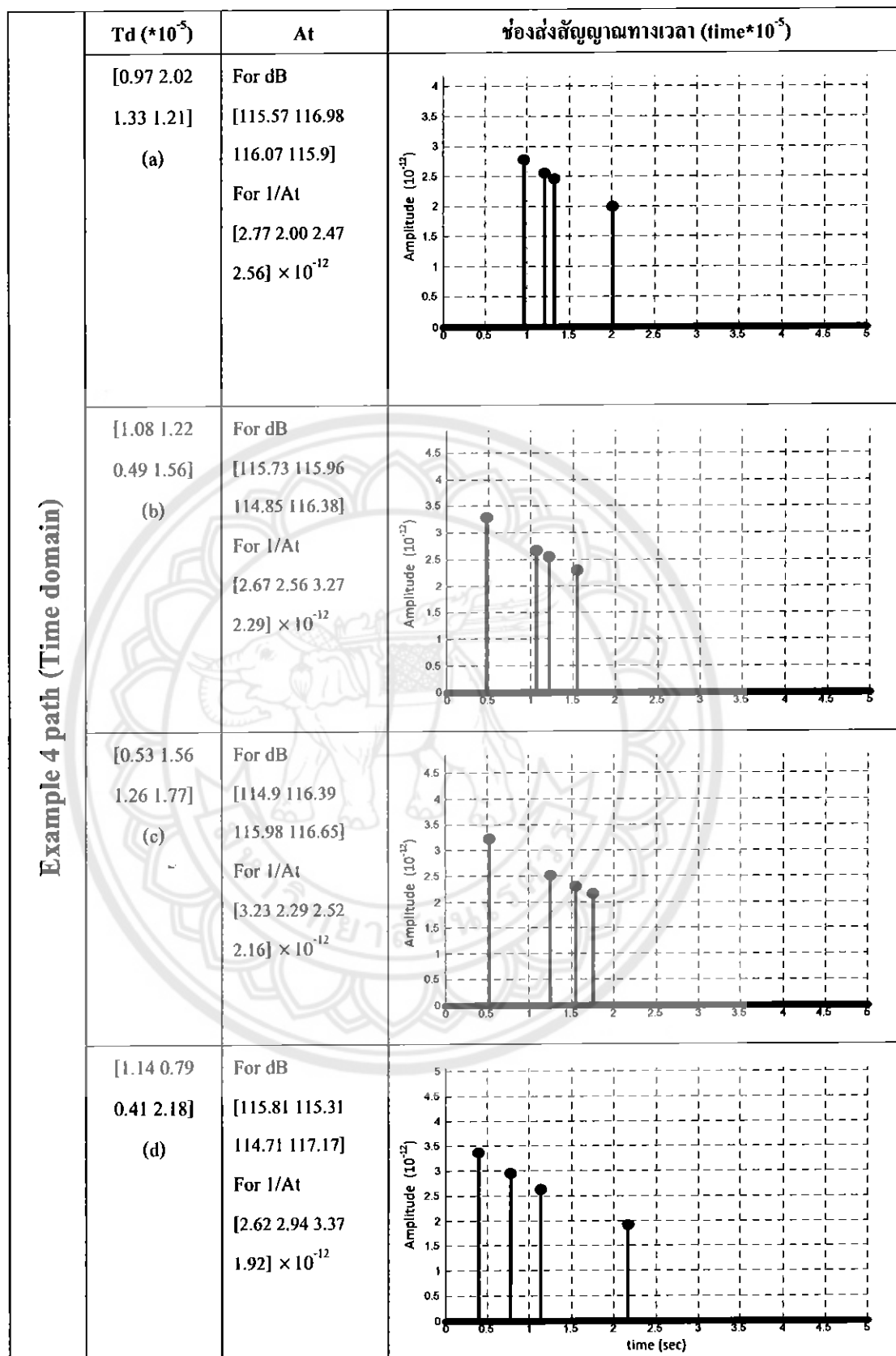
2) ส่วนเส้นกราฟ b c และ d มีค่า BER ที่ดีกว่ากราฟเส้น a อย่างชัดเจนเพราะว่าสัญญาณสามารถส่งผ่านได้ในความถี่ 20 เฮิร์ต และช่องส่งสัญญาณ b น่าจะสามารถส่งสัญญาณได้ดีที่สุดและเป็นไปอย่างที่เราคาดการณ์เอาไว้เพราะค่า BER ในช่องส่งสัญญาณ b มีค่าดีที่สุด

4.4 ผลของช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง

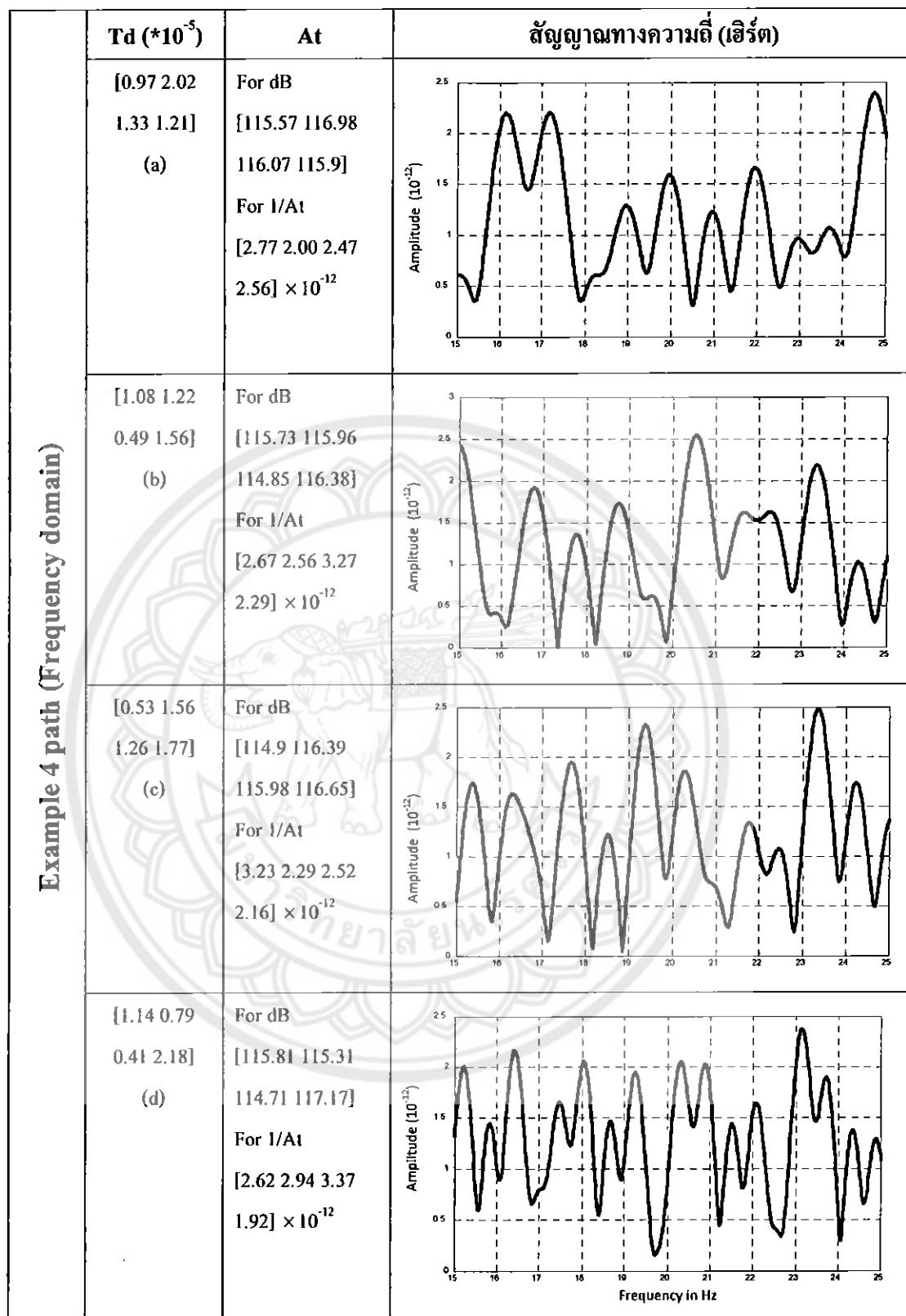
ช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทางนั้นจะเป็นช่องส่งสัญญาณที่มีความซับซ้อนที่สุดสำหรับในกรณีที่จะศึกษานี้ เพราะว่าในภาครับมีสัญญาณถึง 4 สัญญาณเข้ามาพร้อมกันทำให้เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกันและมีโอกาสที่จะทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนมากกว่าช่องส่งสัญญาณแบบ 2 และ 3 เส้นทาง ดังนั้นจากรูปที่ 4.17 ได้แสดงสัญญาณที่ผ่านช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างสัญญาณที่ ผ่านช่องส่งสัญญาณและแสดงการรวมกันของสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง



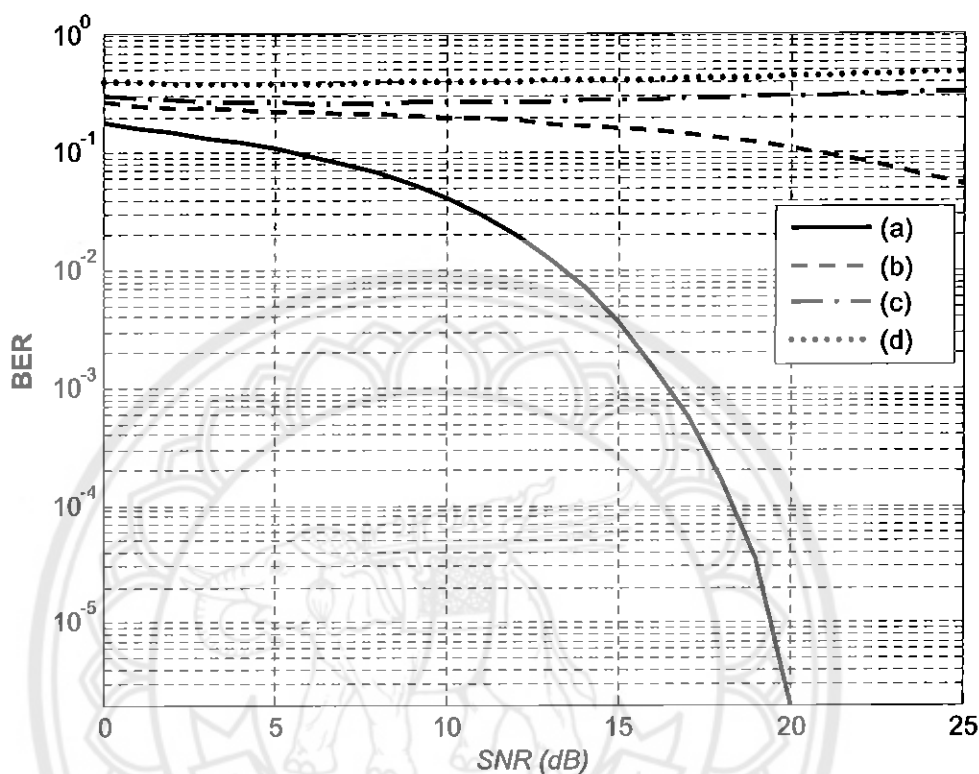
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางเวลาเทียบกับส่วนกลับการลดทอนแบบ 4 เส้นทาง



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างช่องส่งสัญญาณทางความถี่แบบ 4 เส้นทาง ที่แสดงผลตอบสนองทางความถี่

การทดสอบค่า BER ในช่องส่งสัญญาณ 4 เส้นทาง

ผลจากการส่งสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณ a ถึง d ในรูป 4.18 และ 4.19 โดยใช้สัญญาณ BPSK ที่ความถี่พาห้เท่ากับ 20 เฮิร์ต ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.20 ดังนี้



รูปที่ 4.20 ผลการทดลองของช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง (ก่อนเข้ารหัส)

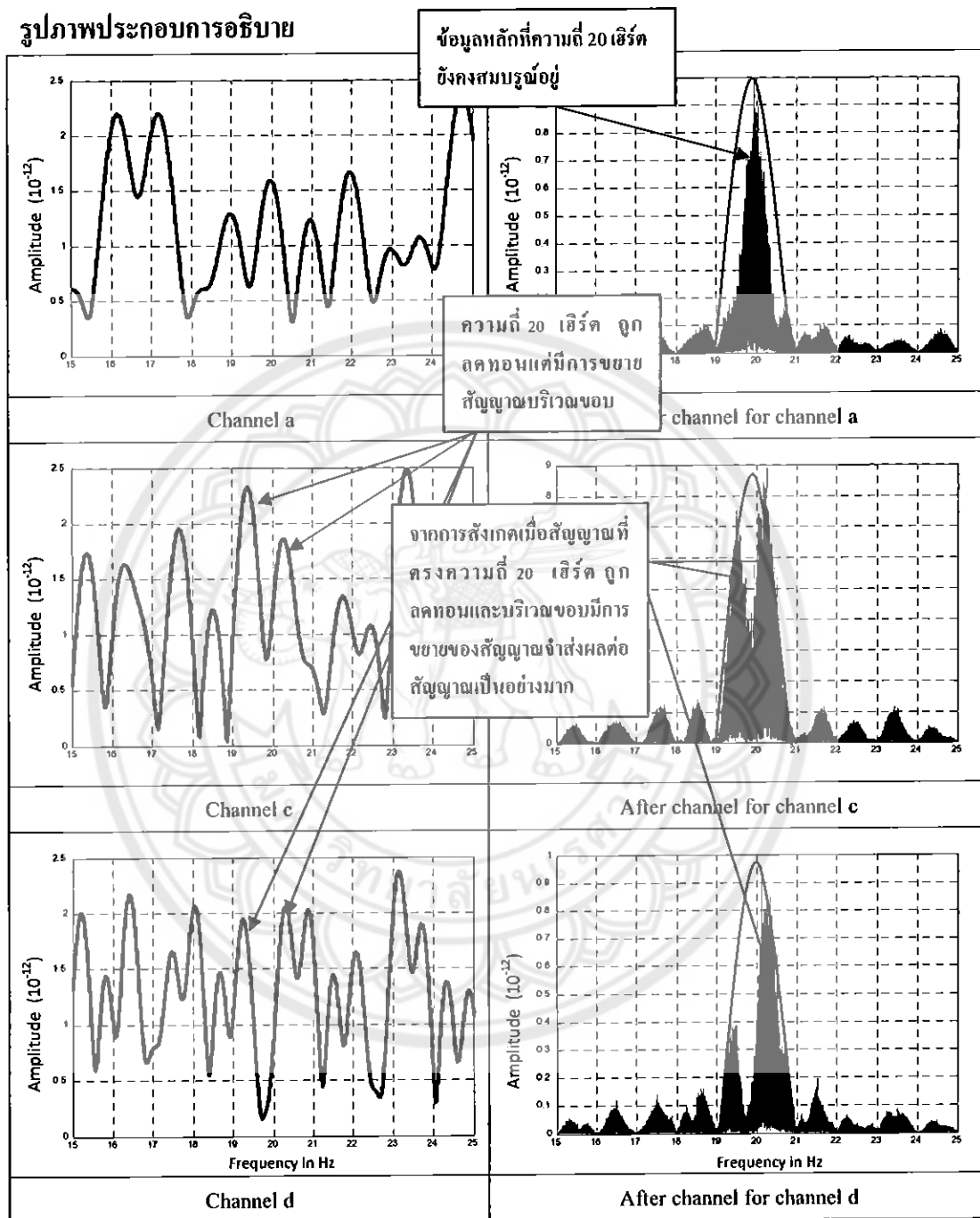
ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ (โดยอ้างช่องส่งสัญญาณในรูปที่ 4.19)

1) จากรูปที่ 4.20 นั้นเส้นกราฟ c และ d นั้นมีลักษณะที่ผิดปกติเพราะว่าเมื่อเพิ่มพลังงานส่งที่สูงมากขึ้นค่า BER กลับไม่ดีขึ้นและมีแนวโน้มที่แย่ลงด้วย จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงรูปของสัญญาณทางความถี่ที่ถูกส่งผ่านช่องส่งสัญญาณทั้งสองเปรียบเทียบกับช่องส่งสัญญาณ a ในรูปที่ 4.19

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.21 นั้นสัญญาณทางความถี่ของช่องส่งสัญญาณ a นั้นลักษณะยังมีถูกลดทอนมากซึ่งข้อมูลของสัญญาณค่อนข้างสมบูรณ์ดังนั้นค่า BER จึงยังคงค่อนข้างดี แต่เมื่อสังเกตสัญญาณทางความถี่ของช่องส่งสัญญาณ c พบว่าถึงแม้ว่าที่ความถี่เท่ากับ 20 เฮิร์ต ไม่ถูกลดทอนไปมากแต่กลับมีการขยายสัญญาณที่บริเวณขอบของความถี่ 20 เฮิร์ต ซึ่งส่งผลให้เกิดโอกาสเกิดความผิดของข้อมูลได้สูงเมื่อทำการหาค่า BER แล้วจึงพบว่าค่า BER นั้นกลับมีค่าที่แย่ลงเมื่อเพิ่มพลังงานส่งขึ้นเพราะว่าบริเวณขอบของความถี่ 20 เฮิร์ต นั้นมีขนาดที่เพิ่มขึ้นความผิดพลาดจะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกรณีนี้จะเหมือนกับสัญญาณทางความถี่ของช่องส่งสัญญาณ d ในรูปที่ 4.21 ซึ่งมี

การขยายสัญญาณบริเวณขอบของความถี่ 20 เฮิร์ตแต่มีค่าลดทอนที่สูงกว่าช่องส่งสัญญาณ c ทำให้ได้กราฟ *BER* ที่เหมือนกันแต่แยกว่าเล็กน้อยเนื่องจากการลดทอนที่สูงกว่า

รูปภาพประกอบการอธิบาย



รูปที่ 4.21 รูปภาพประกอบการอธิบายสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองช่องส่งสัญญาณแบบ 4 เส้นทาง

2) สำหรับกราฟเส้น b ในรูปที่ 4.20 นั้นมีลักษณะที่ถูกลดทอนอย่างมาก ถึงแม้จะเพิ่มพลังงานในการส่งอย่างมากค่า BER ก็ดีขึ้นมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งกรณีนี้ก็ควรหลีกเลี่ยงเช่นกัน

3) สุดท้ายคือกราฟเส้น b เป็นกราฟที่มีค่า BER ที่ดีที่สุดเพราะว่าที่ความถี่ 20 เฮิร์ตสามารถส่งผ่านได้สะดวกที่สุดในทั้งหมด 4 ตัวอย่าง แต่ถ้าวิเคราะห์ดูแล้วสำหรับ BER ที่ต้องการคือ 10^{-6} ต้องใช้ค่า SNR ถึง 20 dB ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากดังนั้นอาจจะต้องมีการแก้ไขให้ดีขึ้นโดยอาจจะใช้การเข้ารหัสหรือเปลี่ยนความถี่พาห้ไปที่ความถี่เหมาะสมกว่านี้

จากที่ได้เห็นถึงผลการทดลองมาทั้ง 4 กรณีที่ได้สุ่มมานั้นสามารถมองเห็นถึงความแตกต่างกันของช่องส่งสัญญาณแต่ละเส้นทาง ซึ่งช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทางนั้นไม่มีความแปรปรวนของค่า BER ที่ได้เลยซึ่งทำให้ทราบเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นเพียงค่าเดียวไม่ส่งผลถึงช่องส่งสัญญาณแต่เมื่อจำนวนเส้นทางเริ่มมากขึ้น ช่องส่งสัญญาณเริ่มมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปตามค่าเวลาของช่องส่งสัญญาณนั้นๆ และยิ่งเส้นทางมากขึ้นค่า BER ที่ได้จะมีแนวโน้มที่แย่ลงและบางกรณีนั้นการเพิ่มพลังงานในการส่งไม่สามารถทำให้ค่า BER ดีขึ้นได้เลยเพราะว่าความถี่ที่ถูกส่งไปนั้นไปเจอช่องส่งสัญญาณที่มีการลดทอนในช่วงนั้นมากทำให้สัญญาณข้อมูลนั้นสูญหายไป สังเกตได้ว่าในการทดลองกรณี 2 3 และ 4 เส้นทางไม่ได้พูดถึงเรื่องของการนำการเข้ารหัสมาใช้เพราะว่าควรเลือกช่องส่งสัญญาณที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการเข้ารหัสเพราะถ้าสัญญาณผ่านช่องส่งสัญญาณที่ไม่ดีสัญญาณที่ได้ถึงแม้จะทำการเข้ารหัสดีเพียงใดก็ไม่ดีเท่ากับการเลือกช่องส่งสัญญาณที่เหมาะสม สำหรับการวิเคราะห์ในเรื่องการเข้ารหัสจะขอเพียงกล่าวไปในกรณี 1 เส้นทางเท่านั้น เนื่องจากเป็นช่องส่งสัญญาณที่มีความแน่นอนสูง (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในกรณีใดๆ) เพราะจะสามารถมองเห็นภาพได้ง่ายขึ้น

สำหรับในบทถัดไปจะเป็นการกล่าวสรุปเกี่ยวกับช่องส่งสัญญาณอีกครั้งจากการทดลองในบทนี้ซึ่งจะพูดถึงความแตกต่างในเชิงความถี่เป็นสำคัญ เนื่องจากง่ายต่อการศึกษามากกว่าทางเวลา

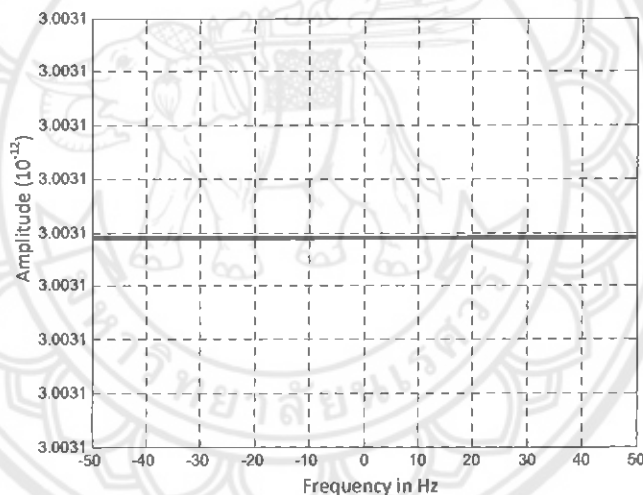
บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการดำเนินโครงการ

สำหรับผลการทดลองในบทที่ 4 ช่องส่งสัญญาณถูกแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ 1 2 3 และ 4 เส้นทางและแต่ละกรณีก็มีความแตกต่างกันไปตามค่าของเวลาหน่วงที่เกิดขึ้น ผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองพบว่าค่าหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์ต่อช่องส่งสัญญาณทางความถี่ดังนี้

1) เวลาหน่วงเพียงค่าเดียวจะไม่ส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณทางความถี่ ช่องส่งสัญญาณจะมีลักษณะราบเรียบ รูปที่ 5.1 ทำให้สัญญาณสามารถผ่านช่องส่งสัญญาณชนิดนี้ได้ในทุกย่านความถี่มีเพียงการลดทอนที่เกิดจากระยะทางและสัญญาณรบกวนเท่านั้นที่มีผลกระทบต่อช่องส่งสัญญาณประเภทนี้ ดังนั้น ช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทางเป็นช่องส่งสัญญาณที่ดีที่สุดในทำการทดลองครั้งนี้



รูปที่ 5.1 ช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทาง

2) สำหรับช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทาง เวลาหน่วงที่เกิดขึ้นจะมี 2 ค่า ซึ่งเวลาหน่วงกรณีที่มีค่าใกล้เคียงกันช่องส่งสัญญาณจะมีความถี่ในการแกว่งตัวน้อยกว่ากรณีที่มีค่าเวลาหน่วงที่ห่างกันดังในรูปที่ 5.2 เพราะว่าถ้าช่องที่เกิดการแกว่งมีความกว้างมากสัญญาณก็จะส่งไปได้อย่างสะดวกแต่ในทางกลับกันช่องส่งสัญญาณยิ่งมีความถี่ในการแกว่งมากจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณอย่างไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ซึ่งจะไม่เกิดผลดีต่อสัญญาณ ดังนั้นสำหรับช่องส่งสัญญาณแบบ 2 เส้นทางยังมีเวลาหน่วงใกล้เคียงกันมากเท่าไรจะทำให้ช่องส่งสัญญาณดีขึ้นเนื่องจากจะเกิดพื้นที่ที่สามารถจะสัญญาณผ่านข้ามไปได้มากขึ้นเท่านั้น

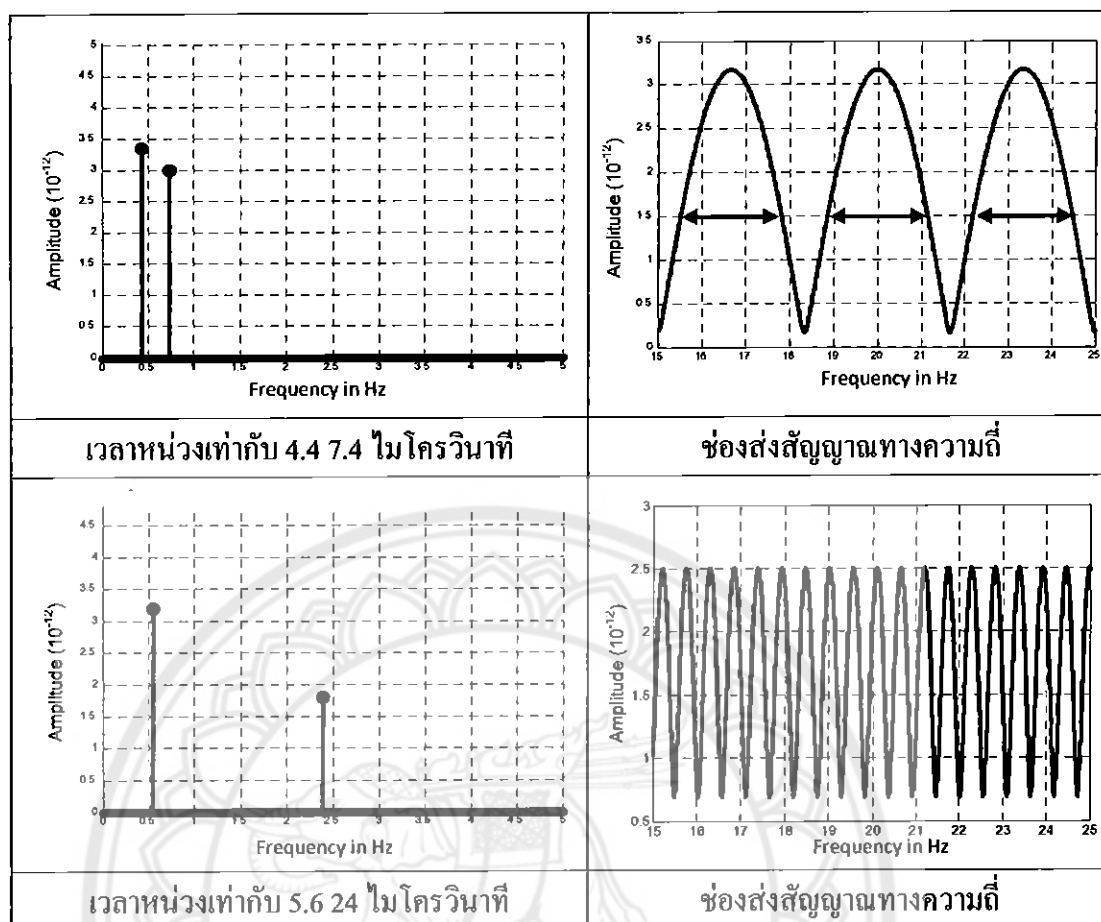
หลังจากได้ทำการทดลองเสร็จสิ้นทำให้ได้ทราบผลของช่องส่งสัญญาณที่มีผลของ multipath fading ว่าแตกต่างจากไม่มีผลของ multipath ตรงที่ช่องส่งสัญญาณจะเกิดการแกว่งตัวไปมาที่ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นหรือ Number of path ทำให้สัญญาณที่ส่งไปเกิดการลดทอนในช่องส่งสัญญาณ โดยขณะที่ช่องส่งสัญญาณที่ไม่มีผลของ multipath จะมีลักษณะที่ราบเรียบดังเช่นในรูปที่ 5.1 เป็นต้น ดังนั้นสำหรับในความเป็นจริงจะมีโอกาสที่จะเกิดช่องส่งสัญญาณที่เป็นแบบ multipath ได้มากกว่าเพราะว่าการส่งสัญญาณต้องมีเส้นทางผ่านสิ่งกีดขวางมากมาย ดังนั้นการทำการศึกษาในเรื่องนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากเพราะถ้าทำการเลือกหาย่านความถี่ที่มีค่าที่เหมาะสมแล้วสัญญาณที่ได้ก็จะมีคุณภาพที่ดีกว่าและยังไปกว่านั้นการเข้ารหัสดังเช่น Convolution Code ที่ได้ทำการทดลองผ่านมาก็จะทำให้สัญญาณดีขึ้นอีกด้วย

5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินโครงการ

- 1) ใช้เวลารันโปรแกรมเป็นเวลานานทำให้การสรุปผลการทดลองเป็นไปอย่างล่าช้า
- 2) ในขั้นตอนการศึกษาในส่วนของทฤษฎีช่วงแรกใช้เวลานานกว่าที่วางแผนไว้ส่งผลให้เวลาในการเขียนโปรแกรมน้อยลงจึงทำให้โปรแกรมที่เขียนไม่ได้ปรับแต่งให้ได้ดีให้สวยงามได้
- 3) ในขั้นตอนการเพิ่มความสามารถในการเข้ารหัส Convolution code กับโปรแกรมแล้วทำการประยุกต์ใช้อินเทอร์เฟซขั้นตอนดังกล่าวนี้ซับซ้อนและใช้เวลานานกว่าจะสามารถทำงานร่วมกันได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) เพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมควรศึกษาในส่วนของทฤษฎีให้เข้าใจอย่างละเอียดก่อน เพื่อให้การเขียนโปรแกรมได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว
- 2) การเขียนโปรแกรมอาจเกิดปัญหาได้บ่อยครั้งควรทำงานอย่างใจเย็น และมีสติ จะช่วยให้การเขียนโปรแกรมได้ดี ถูกต้อง และมีความสุข



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบช่องส่งสัญญาณที่เกิดเวลาหน่วงที่แตกต่างกัน

3) ในกรณี 3 และ 4 เส้นทาง ช่องส่งสัญญาณทางความถี่จะเกิดการแกว่งตัวของสัญญาณมากยิ่งขึ้นจากการทดลองในกรณี 3 และ 4 เส้นทางในบทที่ 4 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกราฟ BER ของทั้ง 2 กรณีพบว่าจากเดิมที่มีเวลาหน่วงอยู่ 3 ค่าและเปลี่ยนมาเป็น 4 ค่ากราฟมีแนวโน้มที่แย่ลง จากรูปที่ 4.20 ในกรณี 4 เส้นทางมีเพียงสัญญาณเดียวคือจากช่องส่งสัญญาณ a เท่านั้นที่สามารถส่งผ่านเข้ามาได้แต่ต้องเสียพลังงานในการส่งที่มาก ดังนั้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อยังมีจำนวนค่าเวลาหน่วงมากยิ่งขึ้นช่องส่งสัญญาณจะมีความแปรปรวนที่สูงขึ้นตามไปด้วยและจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่จะถูกส่งผ่านเข้าไป

4) สำหรับการเข้ารหัสแบบ Convolution Code และอินเทอร์ลิฟนั้น ได้ถูกทำการทดลองเฉพาะในส่วนของช่องส่งสัญญาณแบบ 1 เส้นทางหลังจากการเข้ารหัสแบบ Hard-Decision $R = 1/2$ และ $K = 5$ ซึ่งมีความสามารถที่จะแก้ไขได้ 3 บิตติดต่อกัน ส่งผลให้สัญญาณดีขึ้นจากเดิมประมาณ 1.5 dB ที่ BER เท่ากับ 10^{-5} และในส่วนของการอินเทอร์ลิฟได้ทำการเพิ่มเติมหลังจากสัญญาณได้เข้ารหัส Convolution Code แล้ว ผลการทดลองพบว่าสัญญาณที่ได้ไม่ดีขึ้นจากเดิม ดังนั้นการใช้อินเทอร์ลิฟจึงไม่มีผลกับการปรับปรุงสัญญาณสำหรับการทดลองนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Theodore S. Rappaport. **Types of Small-Scale Fading**. Retrieved September 28, 2010, from <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/339>, Publish Date Dec 31, 2007.
- [2] Theodore S. Rappaport. (2007). **Wireless communications : principles and practice**. (edits 2). New Delhi: Prentice Hall.
- [3] สุรเชษฐ์ กานต์ประชา (ผู้บรรยาย). (2552). **Digital Communication**. พิษณุโลก: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [4] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. (2540). **หลักการไฟฟ้าสื่อสาร (พิมพ์ครั้งที่ 6)**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] Lucian Bentea. **Standard Normal Distribution**. Retrieved September 16, 2010, from <http://mathworld.wolfram.com/StandardNormalDistribution.html>, Publish Date Aug 2008.
- [6] Leon W. Couch, II. **Digital and Analog Communication System (Seventh Edition)**. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- [7] Collin, Robert E. (1985). **Antennas and radio wave propagation**. New York: McGraw-Hill.
- [8] University of Wisconsin. **Gaussian Noise**. Retrieved September 25, 2010, from <http://www.comdis.wisc.edu/vcd202/gaussian.html>.
- [9] พิสิฐ วณิชชานันท์ และคณะ. (2552). **ทฤษฎีรหัสช่องสัญญาณ. บ.แอปเปิ้ล ฟรันทิ่ง กรุ๊ป จำกัด**
- [10] คณะทำงานจัดทำเอกสารวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารและคณะกรรมการโครงการพัฒนาวิชาชีพวิศวกรรมอย่างต่อเนื่องสภาวิศวกร. (2537). **ความรู้พื้นฐานวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร**. บริษัท เคอะ บุ๊คส์ เลิฟเวอร์ และโครงการ ICT-TELECOM online
- [11] Enemy. **Phase Modulation BPSK**. Retrieved October 3, 2010, from http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phase_modulation_BPSK_GPS.svg, Publish Date May 7, 2008.
- [12] Splash. **BER CURVES**. Retrieved February 3, 2011, from http://en.wikipedia.org/wiki/File:DPSK_BER_curves.svg, Publish Date: June 3, 2007.

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายพิมุกต์ อุปลัก

ภูมิลำเนา 146/1 ซ. 15 ถ. ศรีถมอรัตน์ อ. เมือง จ. พิจิตร โลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Pimuk_unu@hotmail.com

