

การศึกษาและประยุกต์ใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบในระบบการสื่อสาร  
แบบแถบกว้างยิ่ง

A STUDY AND APPLICATION OF THE TURBO CODING FOR  
ULTRA-WIDEBAND COMMUNICATION

พลพัทธ์ รุกษ์วันดี  
PONLAPAT RERKWANDEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1295-3

การศึกษาและประยุกต์ใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบในระบบการสื่อสาร  
แบบแถบกว้างยิ่ง

A STUDY AND APPLICATION OF THE TURBO CODING FOR  
ULTRA-WIDEBAND COMMUNICATION

พลพัต ฤกษ์วันดี  
PONLAPAT RERKWANDEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2547  
ISBN 974-15-1295-3

A STUDY AND APPLICATION OF THE TURBO CODING FOR  
ULTRA-WIDEBAND COMMUNICATION

PONLAPAT RERKWANDEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
ON THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1295-3

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและประยุกต์ใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง
นักศึกษา	นายพลพัทธ์ ฤกษ์วันดี
รหัสนักศึกษา	45061099
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	อาจารย์ มนต์ชัย แซ่มซ้อย
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. ประกิจ ตั้งติสานนท์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบเทอร์โบที่ใช้อัลกอริทึมแบบล็อกแมป โดยใช้วิธีการมอดูเลตแบบไบเฟสมาใช้งาน ในสภาวะแวดล้อมของช่องสัญญาณประเภทต่างๆ ดังนี้คือ ช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอก ช่องสัญญาณในสภาวะการใช้งานแบบ LOS และช่องสัญญาณในสภาวะการใช้งานแบบ NLOS ตามลำดับ โดยศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงคาบเวลาเฟรมและจำนวนของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการแทนสัญญาณข้อมูลต่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง เมื่อนำการเข้ารหัสแบบเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบที่ใช้อัลกอริทึมแบบ Chase II มาใช้งานภายใต้ช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอก สมรรถนะของระบบการสื่อสารแบบ UWB ที่ได้จากการจำลองจะพบว่าประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบ UWB เมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานจะให้ประสิทธิภาพในด้านอัตราความผิดพลาดของข้อมูล (BER) ดีกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้การเข้ารหัสช่องสัญญาณหรือใช้วิธีการเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบ นอกจากนี้จากการจำลองระบบยังพบว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนของสัญญาณพัลส์ที่ส่งซ้ำหรือการเพิ่มคาบเวลาเฟรมของการส่งแล้วจะส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบการสื่อสารแบบ UWB ดีขึ้น

Thesis Title	A study and Application of the Turbo Coding for Ultra-Wideband Communication	
Student	Mr. Ponlapat	Rerkwandee
Student ID.	45061099	
Degree	Master of Engineering	
Programme	Information Engineering	
Year	2004	
Thesis Advisor	Mr. Monchai	Chamchoy
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof. Dr. Prakit	Tangtisanon

## ABSTRACT

This thesis presents the performance of Ultra-Wideband (UWB) communication systems that employ the turbo codes, which Log-MAP algorithm was used for iterative decoding. A bi-phase modulation was used for modulating the transmit signal. The performance of UWB communication systems combined with turbo code is considered in several channel environments, namely, the channel that was independent from the effect of environment, LOS channel and finally NLOS channel. The effects of the number of pulse repetition and the frame time duration to the performance of UWB communication systems were investigated. The performances of UWB communication system using turbo code and block turbo code, in which Chase II algorithm was used for iterative decoding are compared under the channel having independence from the environment. According to the simulation result, it is found that the performance in that bit error rate (BER) of UWB communication systems with turbo codes is better than the UWB systems with the block turbo code and uncode systems. Furthermore, the performance of UWB system can be improved by adding the number of pulse repetition or increasing the frame time duration of signal.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก อาจารย์มนต์ชัย แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนวทางในการแก้ปัญหา ฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำงานวิจัยได้ ตลอดจนทำการตรวจทานต้นฉบับของวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนรู้สึกทราบบนซึ่งในการอนุเคราะห์ของท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ประกิจ ตั้งติสสานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณท่านที่ได้มีส่วนช่วยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนี้

- อาจารย์ พิชญ์ สุพรรณกุล ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับระบบการสื่อสาร และ การทำงานของระบบการสื่อสารแบบ UWB

- อาจารย์พนารัตน์ ระวีวรรณ ที่ได้ให้คำแนะนำและกรุณาช่วยในการตรวจทานงานวิจัยนี้

- อาจารย์ สถาพร พรหมวงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและชี้แนวทางในการทำงานวิจัย

- คุณ ดิสพล ฉ่ำเฉียวกุล นักวิจัยแห่งห้องวิจัย DSL ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับรหัสแก้ไขความผิดพลาดรวมถึงคำแนะนำในการเขียนโปรแกรม

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำงานกับผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ คุณฐิติมา ศิลปเจริญพร ที่ได้ให้กำลังใจเป็นอย่างดีต่อผู้เขียนเสมอมา

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อน ๆ ปริญญาโท ห้องวิจัย WISL และ DSL

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พลพัต ฤกษ์วันดี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญสัญลักษณ์.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 โครงประกอบวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง.....	7
2.2.1 สัญญาณแบบเกาส์เซียน.....	8
2.2.2 สัญญาณแบบโมโนไซเคิล.....	9
2.2.3 สัญญาณแบบเกาส์ดับเบิล.....	9
2.3 การเข้าถึงช่องสัญญาณ.....	10
2.3.1 วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบก้าวกระโดดทางเวลา.....	12
2.3.2 วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ DS-CDMA.....	14
2.4 วิธีการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง.....	17
2.4.1 การมอดูเลตตามขนาด.....	18
2.4.2 การมอดูเลตตามตำแหน่งพัลส์.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การมอดูเลตแบบไบนารีเฟส .....	19
2.5 เครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง .....	20
2.6 สรุป .....	20
<b>บทที่ 3 รหัสแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล .....</b>	<b>22</b>
3.1 บทนำ .....	22
3.2 หลักการพื้นฐานของการเข้ารหัส .....	22
3.3 วิธีการเข้ารหัสแบบต่างๆ .....	24
3.3.1 รหัสแบบบล็อก .....	24
3.3.2 รหัสแบบคอนโวลูชัน .....	25
3.3.3 รหัสแบบเทอร์โบ .....	28
3.3.4 รหัสแบบบล็อกเทอร์โบ .....	39
3.4 สรุป .....	45
<b>บทที่ 4 การประยุกต์ใช้งานรหัสแบบเทอร์โบในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง .....</b>	<b>46</b>
4.1 บทนำ .....	46
4.2 แบบจำลองเครื่องส่ง .....	47
4.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ .....	49
4.4 แบบจำลองเครื่องรับ .....	50
4.5 การหาประสิทธิภาพในด้านอัตราความผิดพลาด (BER).....	52
4.6 สรุป .....	55
<b>บทที่ 5 ผลการจำลอง .....</b>	<b>56</b>
5.1 บทนำ.....	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อใช้รหัสเทอร์โบ และบล็อกเทอร์โบ.....	56
5.3 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อใช้จำนวนพัลส์ที่ส่งซ้ำ แตกต่างกัน .....	61
5.4 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดอัตราการส่งข้อมูล แตกต่างกันในสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS.....	66
5.5 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดอัตราการส่งข้อมูล แตกต่างกันในสภาวะแวดล้อมแบบ LOS .....	72
5.6 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งในสภาวะ NLOSและLOS	76
5.7 การเพิ่มระยะการบริการของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	79
บทที่ 6 สรุปผลการจำลองและแนวทางในการพัฒนา .....	85
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก. ทฤษฎีสติติและความน่าจะเป็น.....	91
ภาคผนวก ข. วิธีการถอดรหัสแบบ Chase 2 .....	96
ภาคผนวก ค วิธีการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณ .....	100
ภาคผนวก ง ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบ.....	103
ภาคผนวก จ ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	106
ประวัติผู้เขียน.....	117

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวแปรที่ส่งผลคูณ.....	41
5.1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารระหว่างเทอร์โบ และบล็อกเทอร์โบ.....	58
5.2 ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่ กว้างยิ่ง.....	62
5.3 ค่าตัวแปรที่สำคัญในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่แตกต่างจากค่า ในตารางที่ 5.2 เมื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมแบบไม่เห็นเส้นสายตา.....	67
5.4 ค่าตัวแปรที่สำคัญในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่แตกต่างจากค่า ในตารางที่ 5.2 เมื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมแบบเห็นเส้นสายตา.....	72
5.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลกับ ระยะทางเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS.....	80
5.6 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลกับ ระยะทางเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมแบบ LOS.....	82

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กำลังงานและความถี่ของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน..... 7
2.2	สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน ( $A = 1, T_c = 0.5 \text{ nsec}, \tau = 0.1 \text{ nsec}$ ) ..... 8
2.3	สัญญาณโมโนไซเคิล ( $A = 1, T_c = 0.5 \text{ nsec}, \tau = 0.1583 \text{ nsec}$ )..... 9
2.4	สัญญาณแบบเกาส์เซียนดับเบิลที่ใช้ในการสื่อสารสำหรับระบบ UWB ( $\tau_m = 0.2887 \text{ nsec}$ ).....10
2.5	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งสัญญาณพัลส์ในระบบ TH-CDMA..... 12
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และเวลาที่ใช้ในระบบ TH-CDMA ..... 13
2.7	เครื่องส่งแบบ DS-CDMA..... 14
2.8	ลักษณะของสัญญาณในระบบ DS-CDMA ในระบบการสื่อสารแบบ UWB ..... 15
2.9	เครื่องรับระบบ DS-CDMA..... 16
2.10	สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ ..... 18
2.11	สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามตำแหน่ง (PPM) ..... 19
2.12	สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบสองเฟส.....19
2.13	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....23
3.1	แบบจำลองระบบการสื่อสารที่นำวิธีการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้ ..... 25
3.2	การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ( $G = [7_8, 5_8], K = 3$ ) ..... 25
3.3	แผนภาพ Trellis เมื่อค่า Generator matrix เป็น $[7_8 \ 5_8]$ .....27
3.4	วงจรการเข้ารหัสแบบเทอร์โบ..... 29
3.5	วงจรเข้ารหัสแบบ RSC ..... 29
3.6	วงจรการถอดรหัสแบบวนซ้ำ ..... 32
3.7	การต่อแบบอนุกรมของรหัสแบบบล็อก ..... 40
3.8	รหัสผลคูณ (Product code) ..... 40
3.9	รหัสแบบบล็อกที่มีการทำงานร่วมกันแบบขนาน ..... 41
3.10	บล็อกไดอะแกรมของวงจรการถอดรหัสแบบวนซ้ำอนุกรม ..... 42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	43
3.12	43
3.13	46
4.1	47
4.2	49
4.3	53
5.1	58
5.2	60
5.3	61
5.4	64
5.5	65
5.6	66
5.7	67
5.8	68
5.9	70
5.10	71
5.11	73
5.12	74

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 5 nsec หรืออัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps.....	76
5.14 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อทำการเพิ่มค่าคาบเวลาเฟรมในสถานะแวลด์ลอมแบบ LOS.....	77
5.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อทำงานในสถานะ NLOS และ LOS.....	78
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับส่งข้อมูลและระยะทางในสถานะการใช้งานแบบ NLOS ( $n = 1.47$ ).....	81
5.17 แสดงค่าระยะการบริการที่เพิ่มขึ้นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาประยุกต์ใช้ในสถานะแวลด์ลอมแบบ NLOS ( $n = 1.47$ ).....	82
5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับส่งข้อมูลและระยะทางในสถานะการใช้งานแบบ LOS ( $n = 1.73$ ).....	83
5.19 แสดงค่าระยะการบริการที่เพิ่มขึ้นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาประยุกต์ใช้ในสถานะแวลด์ลอมแบบ LOS ( $n = 1.73$ ).....	84

## สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ที่	คำอธิบาย	หน้าที่
1	$f_H$ คือ ค่าของความถี่บนของระบบกาสื่อสาร	5
2	$f_L$ คือ ค่าขอบความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	5
3	$C$ คือ ความจุของช่องสัญญาณ	6
4	$B$ คือ แบนวิดท์ของช่องสัญญาณ	6
5	$\frac{S}{N}$ คือ อัตราของกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน	6
6	$s(t)$ คือ สัญญาณที่ส่งเข้าไปในช่องสัญญาณในโดเมนเวลา	7
7	$S(f)$ คือ สัญญาณที่ส่งเข้าไปในช่องสัญญาณในโดเมนความถี่	7
8	$G_p$ คือ อัตราขยายการประมวลผล	11
9	$BER$ คือ อัตราการเกิดความผิดพลาดบิต	22
10	$d_i$ คือ ข้อมูลดิจิทัลก่อนทำการเข้ารหัส	22
11	$c_i$ คือ คำรหัส	22
12	$n$ คือ ความยาวของคำรหัสที่ได้จากภาคเข้ารหัส	23
13	$k$ คือ ความยาวของข้อมูลที่ทำกรส่งเข้าภาคเข้ารหัส	23
14	$\frac{E_b}{N_0}$ คือ ค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อความหนาแน่นของพลังงานสัญญาณรบกวน	23
15	$R$ คือ อัตราการเข้ารหัส	23
16	$d_{\min}$ คือ ค่า minimum distance	23
17	$G$ คือ ค่าเมตริกส์ก่อกำเนิด	26
18	RSC คือ วงจรเข้ารหัสแบบ Recursive Systematic Convolution Code	29
19	$D$ คือ ค่า Unit delay operation	30
20	$L(\hat{d})$ คือ ค่าอัตราส่วน A posteriori log-likelihood	32
21	$P(d   y)$ คือ ความน่าจะเป็นที่จะตัดสินใจว่าข้อมูลที่ถูส่งมาคือ $d$ จากข้อมูลที่รับได้ $y$	32
22	$L_e(d)$ คือ ค่า extrinsic information ของรหัสแบบเทอร์โบ	33
23	$\alpha_k$ คือ ค่า Forward recursion	34

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น รวมถึงได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายนั้นมีจุดประสงค์เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ในด้านต่าง ๆ 5 ประการคือ 1) จำนวนข้อมูลที่สามารถส่งได้ 2) อัตราเร็วในการส่งข้อมูล 3) จำนวนของผู้ใช้ในระบบ 4) ระยะทางที่สามารถส่งได้ และ 5) ความสามารถในการทำงานร่วมกัน ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายแบบมัลติมีเดียได้มีบทบาทเพิ่มขึ้น ซึ่งระบบการสื่อสารแบบนี้มีความต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงและมีความต้องการส่งข้อมูลในปริมาณที่มาก ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra – wideband communication systems : UWB) โดยที่ระบบการสื่อสารประเภทนี้นั้นได้ใช้แถบความถี่ (Bandwidth) เท่ากับ 7.5 GHz ซึ่งมีขนาดที่กว้างมาก และส่งผลให้ระบบการสื่อสารนี้มีความสามารถในการส่งข้อมูลในอัตราความเร็วสูงได้ และทาง Federal Communication Commission (FCC) ได้กำหนดช่วงความถี่ที่ใช้ในระบบการสื่อสารนี้อยู่ในช่วง 3.1-10.6 GHz และสเปกตรัมความหนาแน่นกำลังในการส่งให้อยู่ในระดับไม่เกิน  $-41.3 \text{ dBm} / \text{MHz}$  ซึ่งเป็นระดับกำลังงานของสัญญาณรบกวนเพื่อไม่ให้ระบบการสื่อสารนี้ไปรบกวนกับระบบการสื่อสารเดิมที่มีอยู่ แต่ระบบการสื่อสารนี้จะถูกรบกวนจากระบบการสื่อสารเดิมรวมถึงการรบกวนจากสัญญาณรบกวนในระบบ ทำให้สัญญาณที่รับได้ในภาครับเกิดความผิดพลาดขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบนี้ลดลง

### 1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นระบบการสื่อสารแบบ UWB ได้ถูกจำกัดกำลังงานในการส่งไว้ที่ระดับสัญญาณรบกวน และระบบการสื่อสารนี้ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและระบบการสื่อสารเดิมที่ใช้อยู่ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง เมื่อนำเอารหัสแก้ความผิดพลาด (Error correcting code) มาใช้งานร่วมกับระบบการสื่อสารนี้ โดยจะเน้นไปที่รหัสเทอร์โบ (Turbo code) [1] ซึ่งเป็นรูปแบบของรหัสที่มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันความผิดพลาดและได้ถูกนำไปใช้งานในระบบสื่อสารหลายประเภท เช่น

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น และรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ [2] ซึ่งเป็นการนำเอารหัสแบบเทอร์โบมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับรหัสแบบบล็อก โดยที่ได้มีการนำเอารหัสแบบบล็อกเทอร์โบมาใช้งานในระบบการสื่อสารแบบที่มีการส่งข้อมูลแบบแพ็กเก็ต เช่นระบบเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless LAN :WLAN) ระบบเครือข่ายไร้สายในเมือง (Wireless Metropolitan Area Network : WMAN) เป็นต้น ซึ่งการนำเอารหัสแก้ความผิดพลาดไปใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในด้านของความผิดพลาดของข้อมูลที่ภาครับของระบบการสื่อสาร และผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะนำเสนอในรูปแบบของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate :BER) ซึ่งค่านี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ ตลอดจนนำไปใช้ในการกำหนดระยะของการให้บริการในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยที่สามารถสรุปวัตถุประสงค์โดยรวมได้ดังนี้คือ เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง ให้มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยทฤษฎีของการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาด ทฤษฎีของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง ทฤษฎีของเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ทฤษฎีของระบบการสื่อสารแบบแอสิงโครนัส เป็นต้น โดยที่ทฤษฎีการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดนั้นเป็นวิธีการที่ใช้ในการแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ภาครับ โดยในการแก้ความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้นั้น จะอาศัยข้อมูลที่เพิ่มเข้าไปในระบบการสื่อสารที่เรียกว่า parity check bit เป็นตัวตรวจจับและแก้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยที่วิธีการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบด้วยกัน ได้แก่ รหัสแบบบล็อก (Block code) และรหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution code) ซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานสำหรับรหัสแก้ความผิดพลาด จากนั้นจึงได้มีการพัฒนามาเป็นรหัสแบบ Trellis-Coded Modulation (TCM) ซึ่งเป็นการนำเอาวิธีการเข้ารหัสมาทำงานร่วมกับวิธีการมอดูเลตสัญญาณ ทำให้สามารถส่งข้อมูลในปริมาณที่มากขึ้น และได้มีการพัฒนามาเป็นรหัสแบบเทอร์โบ ที่สามารถให้ประสิทธิภาพในด้านอัตราความผิดพลาดของบิตที่น้อย แม้ว่าจะทำการส่งข้อมูลด้วยกำลังงานที่ต่ำก็ตาม โดยที่ประสิทธิภาพของระบบสามารถเพิ่มขึ้นได้ โดยวิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำ (Iterative decoding) แต่ทว่ารหัสแบบเทอร์โบมีข้อเสียในด้านความซับซ้อนของวงจรเข้ารหัสที่มาก ดังนั้นจึงได้มีการนำเอารหัสแบบบล็อกมาใช้งานร่วมกับวิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำ เพื่อลดปัญหาในด้านความซับซ้อนของภาค

เข้ารหัสและถอดรหัส รวมถึงสามารถนำเอาหลักการของวิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำมาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย โดยที่รหัสประเภทนี้จะเรียกว่า รหัสบล็อกเทอร์โบ

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยังเป็นระบบการสื่อสารที่กำลังได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย ซึ่งเป็นระบบที่ต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง แต่ทว่าจากการที่กำลังส่งของระบบการสื่อสารประเภทนี้ได้ถูกจำกัดให้อยู่ในระดับต่ำ ประกอบกับแถบความถี่ของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นได้ไปทับซ้อนกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการรบกวนจากระบบการสื่อสารอื่น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารลดลง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่สนใจที่จะนำเอาเทคนิคต่างๆ มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้สนใจที่จะใช้วิธีการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดมาใช้งาน และจากการรวบรวมข้อมูลพบว่าระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่ยิ่งยังไม่ได้มีมาตรฐานของรหัสแก้ความผิดพลาด และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเอารหัสแก้ความผิดพลาดมาใช้ในระบบการสื่อสารประเภทนี้ยังขาดการค้นคว้าและพัฒนาอยู่ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารประเภทอื่น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการจำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของรหัสแก้ความผิดพลาดเมื่อนำไปใช้ในระบบการสื่อสารประเภทนี้ เพื่อที่จะหาว่าวิธีการเข้ารหัสประเภทใดมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบการสื่อสารนี้

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอารหัสแก้ความผิดพลาดประเภทรหัสเทอร์โบ และรหัสบล็อกเทอร์โบ มาใช้ในระบบการสื่อสารประเภทนี้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารนี้ รวมถึงสัญญาณที่เกิดจากการที่เส้นทางในการเดินทางของคลื่นมีมากกว่า 1 เส้นทาง ซึ่งวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งคือ วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบก้าวกระโดดทางเวลา (Time hopping) โดยที่ใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบไบเฟส (Bi-phase modulation) และเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจึงได้ใช้ช่องสัญญาณที่ได้จากการทดลอง โดยในการจำลองนั้นจะใช้ช่องสัญญาณในสภาวะแวดล้อมภายในห้อง chamber และภายในอาคาร (Indoor environment) ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกวิธีการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดที่จะนำมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งต่อไป

## 1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยที่ในบทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์และทฤษฎีที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงขอบเขตของการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ส่วนรายละเอียดของบทต่างๆ อีก 5 บทมีดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีโดยรวมของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง ซึ่งจะประกอบไปด้วยรูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่ง เครื่องส่งและเครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง วิธีในการมอดูเลตสัญญาณ และวิธีการที่ใช้ในการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบสื่อสารประเภทนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีโดยรวมของรหัสแก้ความผิดพลาด หลักการเข้ารหัสและถอดรหัส คุณสมบัติของข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส รูปแบบของรหัสที่สำคัญ หลักการทำงานของรหัสเทอร์โบ และรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและทำการจำลอง ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง และการประยุกต์ใช้งานรหัสแบบเทอร์โบ และบล็อกเทอร์โบเข้ามาทำงานร่วมกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ใช้วิธีเข้าถึงช่องสัญญาณแบบก้าวกระโดดทางเวลา

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง เมื่อนำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาใช้ งาน รวมถึงทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเมื่อใช้รหัสแก้ความผิดพลาดที่แตกต่างกัน

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปการวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมด พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการศึกษาและการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งต่อไป

## บทที่ 2

# ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

### 2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นไม่ได้เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ โดยที่เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในปี 1980 ซึ่งเริ่มต้นใช้งานในระบบเรดาร์เป็นหลักอันเนื่องมาจากคุณสมบัติข้อหนึ่งของระบบการสื่อสารประเภทนี้ที่มีการใช้แบนด์วิดท์ในระบบการสื่อสารที่มากทำให้สามารถได้รับข้อมูลที่มีความแม่นยำในด้านตำแหน่งของวัตถุที่เที่ยงตรงมาก จนกระทั่งปัจจุบันได้เริ่มนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้งานในระบบการสื่อสารมากขึ้น อันเนื่องมาจากการพัฒนาของเทคโนโลยีการตัดต่อความเร็วสูง (high-speed switching) ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย หรือระบบการสื่อสารที่ต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง โดยที่เทคโนโลยีนี้จะมี ความแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเช่น การสื่อสารแบบแถบแคบ และ การสื่อสารแบบแถบกว้าง อยู่ด้วยกัน 2 ประการคือ

1) ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นมีการใช้แบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณมากกว่า 25 % ของความถี่กลาง โดยที่การหาค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\%BW = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่  $f_H$  คือค่าขอบความถี่บนของระบบการสื่อสาร

$f_L$  คือค่าขอบความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร

ในระบบการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งนี้จะกำหนดแบนด์วิดท์ของระบบได้จากช่วงห่างระหว่างความถี่บนและความถี่ล่างของระบบ โดยที่ค่าของความถี่ทั้ง 2 นี้จะกำหนดได้จากความถี่ที่ให้ระดับกำลังงานของสัญญาณต่ำกว่าระดับกำลังงานสูงสุดอยู่ 10 dB ซึ่งเป็นระดับของกำลังสัญญาณรบกวนพื้น (noise floor) ของระบบการสื่อสารประเภทอื่น

2) ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเป็นระบบการสื่อสารที่ไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณพาห้เข้ากับสัญญาณข้อมูลก่อนทำการส่งข่าวสาร ดังนั้นในภาคส่งของระบบการสื่อสารแบบ

แถบความถี่กว้างยิ่งจึงไม่ต้องใช้อุปกรณ์ประเภทการมอดูเลตความถี่ (RF Modulation) และเครื่องส่งที่มีกำลังมาก จึงเป็นการลดต้นทุนของระบบการสื่อสาร

ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ทาง FCC (Federal Communication Commission ) ได้อนุญาตให้ใช้ในระบบการสื่อสารนี้จะอยู่ในช่วง 3.1 – 10.6 GHz และจากการที่ช่วงความถี่ที่ทาง FCC กำหนดให้ใช้มีขนาดที่กว้างมาก ดังนั้นระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจึงสามารถส่งผ่านข้อมูลข่าวสารในระบบการสื่อสารได้เป็นจำนวนมาก โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความจุของระบบการสื่อสารกับแบนวิทที่ใช้ในระบบการสื่อสารนี้ สามารถแสดงได้ในสมการที่ 2.2

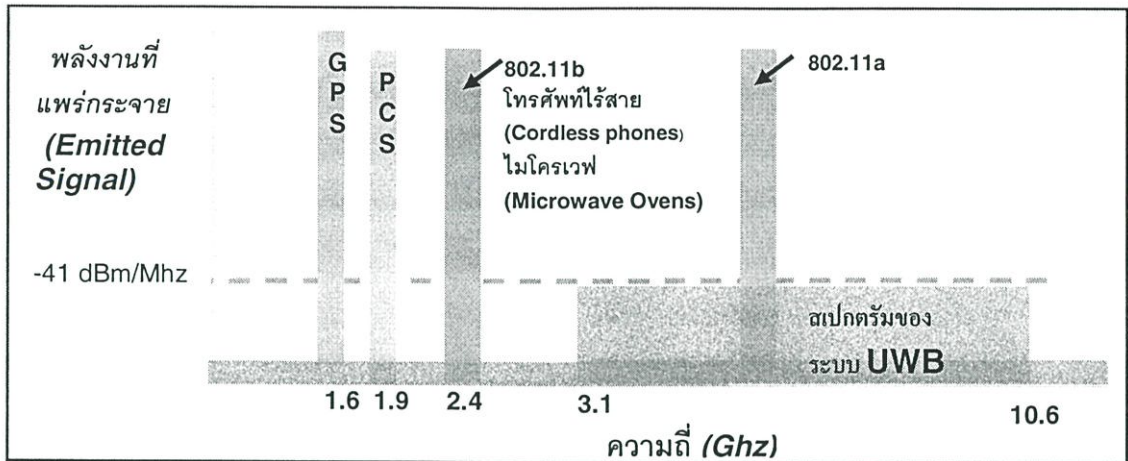
$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.2)$$

โดยที่  $C$  คือ ความจุของช่องสัญญาณ (Channel capacity) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (bps)

$B$  คือ แบนวิทของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูล มีหน่วยเป็น (Hz)

$\frac{S}{N}$  คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนวิทของระบบที่กว้างมาก และได้ไปทับซ้อนกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ระบบเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless Local Area Networks: WLAN) เป็นต้น ดังนั้นทาง FCC จึงได้มีการกำหนดกำลังงานของระบบที่แพร่ออกมาในช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารประเภทนี้ไว้ที่ระดับ  $-41.3 \text{ dBm/MHz}$  ซึ่งเป็นระดับของกำลังงานของสัญญาณรบกวน โดยในรูปที่ 2.1 แสดงระดับกำลังงานและช่วงความถี่ของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารอื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 กำลังงานและความถี่ของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่าระดับกำลังงานของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะอยู่ในระดับที่ต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน ดังนั้นสัญญาณของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจึงไม่ไปรบกวนกับสัญญาณของระบบการสื่อสารเดิม ซึ่งเป็นเหตุให้สามารถนำเอาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งไปใช้งานในทันที มีระบบการสื่อสารเดิมใช้อยู่ได้

## 2.2 รูปแบบของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเป็นระบบการสื่อสารที่ไม่ใช้สัญญาณพาห้ในการนำพาเอาสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่งออกไปสู่ช่องสัญญาณ โดยที่สัญญาณที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจะใช้สัญญาณที่มีรูปแบบเป็นสัญญาณอิมพัลส์ในการส่งข้อมูล โดยสัญญาณอิมพัลส์ที่ใช้ในการส่งจะมีคาบของสัญญาณที่สั้นมาก ดังนั้นเมื่อทำการแปลงสัญญาณที่ทำการส่งจะมีแถบความถี่ที่กว้างมาก โดยที่ในการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลามาเป็นโดเมนความถี่นี้จะสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp^{-j2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

โดยที่  $s(t)$  คือ สัญญาณที่ใช้ในการส่งในโดเมนเวลา

$S(f)$  คือ สัญญาณที่ใช้ในการส่งเมื่อถูกแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่

รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน สัญญาณพัลส์แบบโมโนไซเคิล และสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเบิลตัน เป็นต้น โดยที่สัญญาณที่ใช้ในการส่งในระบบการสื่อสารประเภทนี้จะมีคุณสมบัติที่สอดคล้องกันอยู่หนึ่งข้อคือ สัญญาณอิมพัลส์ที่ใช้ในการส่งนั้นเมื่อทำการแปลงสัญญาณในโดเมนความถี่แล้ว จะต้องสอดคล้องกับช่วงความถี่ที่ทาง FCC กำหนด

### 2.2.1 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน (Gaussian pulse)

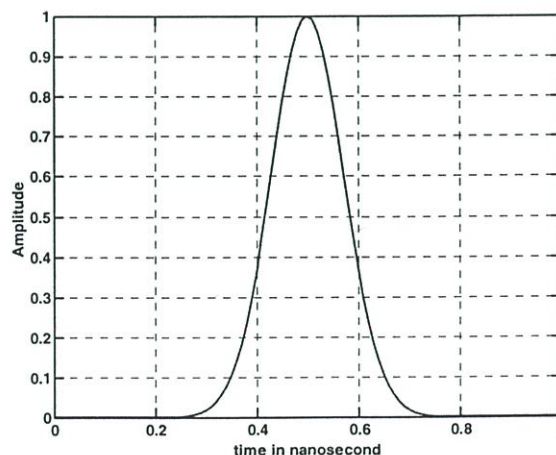
สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนนั้นจะแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่ารูปร่างของสัญญาณจะมีรูปร่างเหมือนการแจกแจงข้อมูลที่มีลักษณะแบบปกติ (normal distribution) โดยที่สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$s(t) = A \exp \left[ -\left[ \frac{(t-T_c)}{\tau} \right]^2 \right] \quad (2.4)$$

โดยที่  $A$  คือ ขนาดของสัญญาณ

$\tau$  คือ ค่าตัวแปรของสัญญาณพัลส์ (Pulse Shape parameter)

$T_c$  คือ ค่าคาบเวลาของสัญญาณชิป

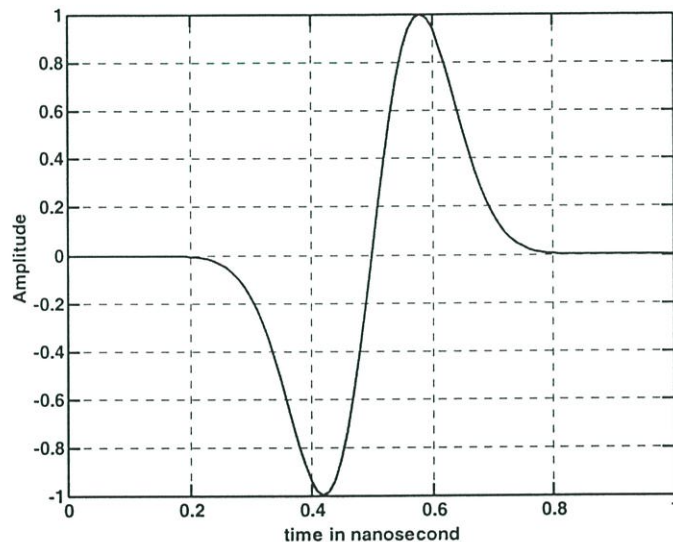


รูปที่ 2.2 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน ( $A = 1, T_c = 0.5$  nsec,  $\tau = 0.1$  nsec)

### 2.2.2 สัญญาณพัลส์แบบโมโนไซเคิล (Monocycle pulse signal)

สัญญาณพัลส์แบบโมโนไซเคิลนั้นจะมีรูปร่างของสัญญาณคล้ายกับสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนอันดับที่ 2 โดยที่สัญญาณพัลส์นี้สามารถสร้างได้จากสมการที่ 2.5 โดยที่ตัวแปรต่างๆ ในสมการนี้จะเหมือนกับตัวแปรที่ได้อธิบายมาก่อนแล้วในสมการที่ 2.4 และรูปร่างของสัญญาณพัลส์แบบโมโนไซเคิลจะแสดงในรูปที่ 2.3

$$s(t) = \frac{2A}{\tau} \sqrt{\exp} \times (t - T_c) \times \exp^{-2 \times \left[ \frac{(t - T_c)}{\tau} \right]^2} \quad (2.5)$$



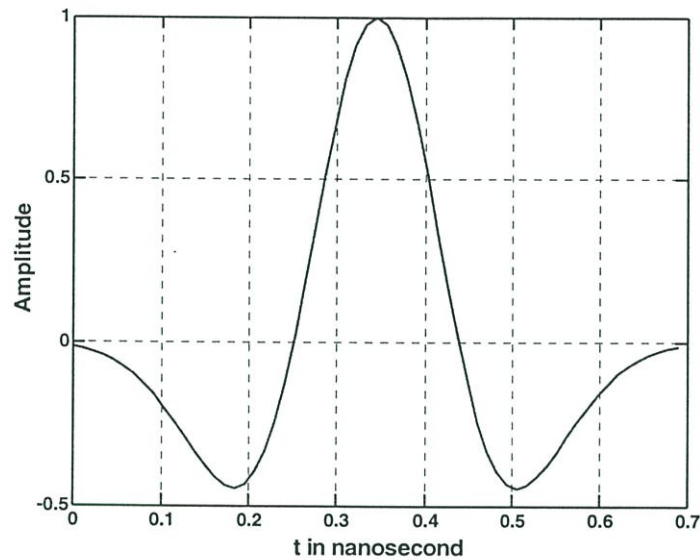
รูปที่ 2.3 สัญญาณโมโนไซเคิล ( $A = 1, T_c = 0.5 \text{ nsec}, \tau = 0.1583 \text{ nsec}$ )

### 2.2.3 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเบิล (Gaussian doublet)

สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียนดับเบิลเป็นสัญญาณที่ได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่สองของสัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน ซึ่งสัญญาณแบบเกาส์เซียนดับเบิล นั้นสามารถสร้างได้จากสมการที่ (2.6)

$$s(t) = \left[ 1 - 4\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] \exp \left[ -2\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

โดยรูปที่ 2.4 แสดงรูปร่างของสัญญาณแบบเกาส์เซียนดับเบิล



รูปที่ 2.4 สัญญาณแบบเกาส์เซียนดับเบิลที่ใช้ในการสื่อสารสำหรับระบบ UWB

$$(\tau_m = 0.2887 \text{ nsec})$$

### 2.3 การเข้าถึงช่องสัญญาณ

การเข้าถึงช่องสัญญาณนั้นเป็นวิธีการเพื่อเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและเป็นวิธีการที่ทำให้ผู้ใช้หลายๆ คนสามารถใช้ช่องสัญญาณได้พร้อมกัน โดยที่ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะใช้วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณหลักๆ อยู่ด้วยกัน 2 วิธีซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบการแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access : CDMA) คือ

1 ) วิธีการกระโดดทางเวลา (Time Hopping) สัญญาณข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายจะส่งในช่วงเวลา (time slots) ที่แตกต่างกันในแต่ละเฟรมเวลา โดยที่ช่วงเวลาที่ส่งของผู้ใช้แต่ละรายจะถูกกำหนดโดยรหัสของผู้ใช้แต่ละราย

2 ) วิธีการจัดลำดับโดยตรง (Direct Sequence) ในการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบนี้สัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายจะถูกคูณด้วยสัญญาณรหัสแผ่ความถี่โดยตรง โดยที่ผู้ใช้แต่ละคนจะใช้รหัสสัญญาณแผ่ที่แตกต่างกัน

วิธีการในการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบการแบ่งรหัสนั้นผู้ใช้แต่ละรายจะใช้ความถี่ในการส่งสัญญาณข้อมูลความถี่เดียวกัน โดยที่ในการแยกว่าสัญญาณที่รับได้เป็นของรายใดนั้นจะใช้รหัส

สัญญาณแต่ละเป็นตัวอย่าง ซึ่งผู้ใช้แต่ละรายจะมีรหัสเฉพาะที่แตกต่างกัน โดยที่ค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสแต่ละตัว จะมีค่าที่ต่ำ ที่ภาครับของสัญญาณในระบบจะอาศัยคุณสมบัตินี้ในการแยกเอาสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณที่รับได้เมื่อที่ภาครับของระบบการสื่อสารทราบรหัสแม่ที่ใช้ในภาคส่งของระบบการสื่อสาร เนื่องจากแบนด์วิธของรหัสแม่จะมีขนาดที่มากกว่ารหัสของสัญญาณข้อมูลมาก ดังนั้นกระบวนการในการเข้ารหัสนี้จะเป็นการขยายแบนด์วิธของสัญญาณและจะทำการเรียกกระบวนการนี้ว่าการมอดูเลตแผ่สเปกตรัม (Spread-spectrum (SS) modulation) และสัญญาณที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกเรียกว่าสัญญาณแผ่สเปกตรัม (spread-spectrum signal) และกระบวนการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัสนั้นบ่อยครั้งจะเรียกว่าวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแผ่สเปกตรัม (spread-spectrum multiple access)

ข้อกำหนดในการที่จะสามารถบอกได้ว่าเป็นการมอดูเลตแบบแผ่สเปกตรัม นั้นจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไข 2 ข้อคือ

- 1) แบนด์วิธของสัญญาณที่ส่งออกไปในช่องสัญญาณต้องมากกว่าแบนด์วิธของสัญญาณข้อมูลที่ยังไม่เข้ารหัสแผ่สเปกตรัม
- 2) แบนด์วิธของสัญญาณที่ส่งออกไปต้องไม่ขึ้นอยู่กับข้อมูลข่าวสารที่ยังไม่ได้เข้ารหัสแบบแผ่สเปกตรัม

การมอดูเลตแบบแผ่สเปกตรัมจะแปลงสัญญาณข้อมูลข่าวสารไปเป็นสัญญาณที่ใช้ส่งออกไปสู่ช่องสัญญาณที่มีแบนด์วิธที่มากขึ้น และสามารถทำได้โดยนำเอาสัญญาณข้อมูลมาทำการเข้ารหัสแผ่สเปกตรัม โดยที่รหัสสัญญาณแผ่สเปกตรัมนั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับสัญญาณข้อมูล และมีแบนด์วิธที่กว้างเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบนด์วิธสัญญาณข้อมูล ซึ่งการเข้ารหัสประเภทนี้จะทำให้กำลังของสัญญาณที่ต้องการส่งนั้นกระจายตลอดความถี่ของช่องสัญญาณ ทำให้ระดับความหนาแน่นของกำลังงานสัญญาณมีค่าต่ำ และอัตราส่วนระหว่างแบนด์วิธของสัญญาณที่ส่งกับสัญญาณข้อมูลก่อนการเข้ารหัสแผ่สเปกตรัม จะถูกเรียกว่า อัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain :Gp) ของระบบสเปกตรัมแผ่

$$Gp = \frac{B_r}{B_i} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $B_r$  คือแบนด์วิธของสัญญาณที่ส่ง

$B_i$  เป็นแบนด์วิธของสัญญาณข้อมูลก่อนทำการเข้ารหัส

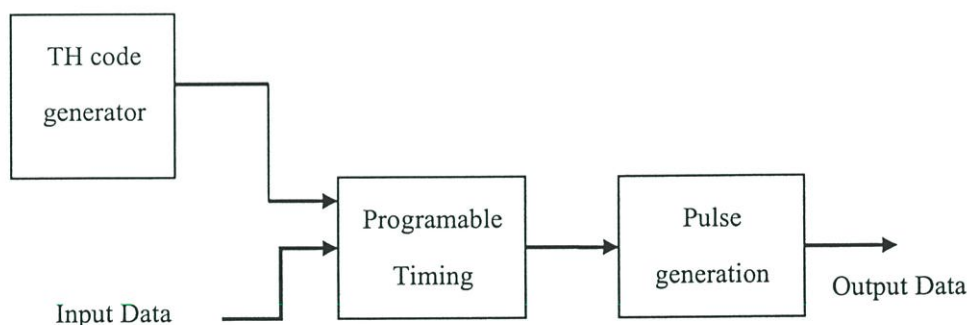
โดยที่เครื่องรับของระบบการสื่อสารประเภทนี้จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณที่เป็นรหัสแม่ความถี่ ซึ่งถูกสร้างจากการซิงโครไนซ์ระหว่างภาคส่งและภาครับสัญญาณใน

ระบบสื่อสาร เพื่อใช้ในการนำเอาสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณที่รับได้ ซึ่งในการแยกสัญญาณที่ต้องการจากสัญญาณที่รับได้ทั้งหมดนั้นภาครับสัญญาณต้องทราบรหัสแอสเปกตรัมที่ใช้ที่ภาคส่งสัญญาณ โดยที่รายละเอียดของวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 2.3.1 วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบก้าวกระโดดทางเวลา ( Time Hopping)

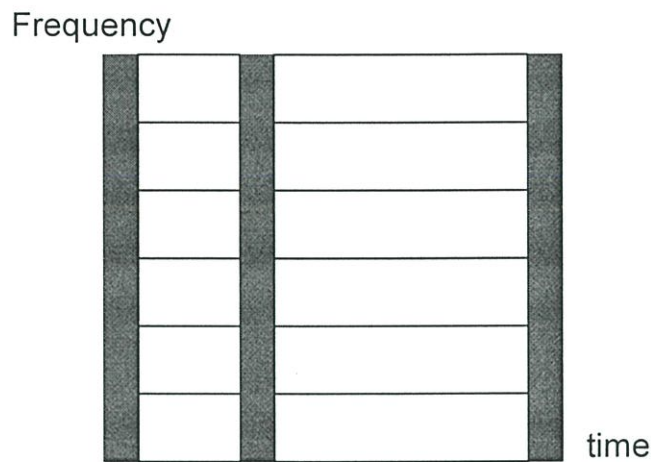
ในระบบการสื่อสารแบบก้าวกระโดดทางเวลา (TH-CDMA) สัญญาณข้อมูลจะถูกส่งในช่วงเวลาที่กำหนด โดยรหัสของผู้ใช้งานแต่ละคน โดยวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณในลักษณะนี้แกนเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นเฟรม และในแต่ละเฟรมจะถูกแบ่งออกเป็น  $M$  ไทม์สล็อต โดยที่ช่วงเวลาที่อนุญาตให้ผู้ใช้งานแต่ละคนส่งสัญญาณออกไปในแต่ละไทม์สล็อต นั้นจะถูกกำหนดโดยรหัสของแต่ละคน ซึ่งผู้ใช้แต่ละรายจะใช้ไทม์สล็อตที่แตกต่างกันในแต่ละเฟรม และในการส่งสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายจะสามารถส่งข้อมูลทั้งหมดได้ใน 1 ไทม์สล็อต แทนที่จะเป็น  $M$  ไทม์สล็อต ดังนั้นความถี่ในการส่งที่เพิ่มขึ้นด้วยตัวประกอบ  $M$  โดยที่บล็อกไดอะแกรมของระบบการส่งแบบ TH-CDMA นั้นแสดงในรูปที่

2.5



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งสัญญาณพัลส์ในระบบ TH-CDMA

ในรูปที่ 2.6 แสดงกราฟในแกนเวลาและความถี่ของระบบ TH-CDMA จากรูปจะพบว่าในการส่งสัญญาณข้อมูลในระบบ TH-CDMA จะใช้แถบความถี่ที่กว้างมาก แต่ใช้เวลาในการส่งของผู้ใช้แต่ละรายที่สั้นๆ ในทุกช่วงเวลา



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และเวลาที่ใช้ในระบบ TH-CDMA

#### 2.3.1.1 คุณสมบัติของระบบ TH-CDMA

##### 1) การเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access)

จากการที่มีการกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการส่งสัญญาณในเวลาเดียวกันมีค่าที่ต่ำ อันเนื่องมาจากการที่ผู้ใช้แต่ละคนใช้รหัสในการกระโดดของช่วงเวลาที่แตกต่างกัน และหากเกิดเหตุการณ์ที่ผู้ใช้หลายคนส่งสัญญาณข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันแล้ว การนำเอาการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดมาใช้เพื่อที่จะทำให้มั่นใจในการที่จะสามารถนำเอาสัญญาณที่ต้องการกลับคืนมาจากสัญญาณที่รับได้

##### 2) การแทรกสอดแบบแถบแคบ (Narrowband interference)

สัญญาณที่ใช้ส่งในระบบ TH-CDMA นั้นจะถูกส่งในช่วงเวลาที่น้อยลง ซึ่งการลดลงนั้นจะเท่ากับ  $1/G_p$  ซึ่งตัวแปร  $G_p$  จะแทนอัตราการขยายการประมวลผล และที่เครื่องรับจะรับสัญญาณแทรกสอดในช่วงเวลาที่เป็น  $1/G_p$  เปอร์เซ็นต์ของเวลา ซึ่งกำลังของสัญญาณแทรกสอดจะถูกลดลงด้วยตัวแปร  $G_p$

##### 3) ความน่าจะเป็นของการถูกดักจับของสัญญาณมีค่าต่ำ (Low probability of interception)

ในระบบ TH-CDMA ความถี่ของสัญญาณที่ส่งของผู้ใช้แต่ละคนจะมีค่าคงที่ แต่จะแตกต่างกันที่เวลาในการส่งและช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งจะสั้นในกรณีที่ในระบบมีผู้ใช้หลายคนจะทำให้เครื่องรับยากในการหาช่วงเริ่มต้นและช่วงสิ้นสุดของการส่งและยากที่จะรู้ว่าผู้ใช้งานรายใดส่งมา

จากคุณสมบัติดังกล่าวในข้างต้นสามารถแสดงข้อดีและข้อเสียของระบบสื่อสารแบบ TH-CDMA ได้ดังนี้

- ข้อดีของระบบ TH-CDMA

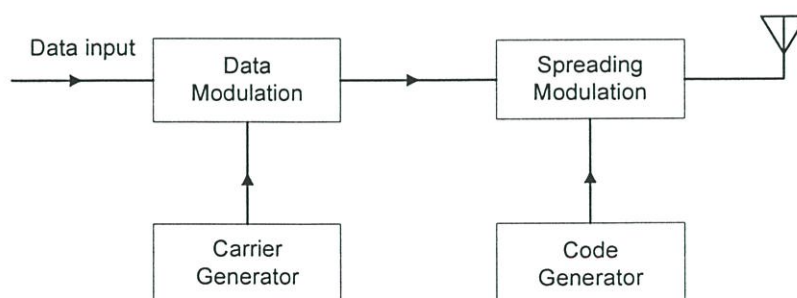
- 1) ง่ายในการสร้างและนำไปใช้งาน
- 2) มีประโยชน์ในระบบการสื่อสารที่กำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณข้อมูลจะส่งถูกจำกัด แต่ไม่ได้จำกัดกำลังงานสูงสุด (Peak power) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ข้อมูลถูกส่งออกไปในช่วงเวลาสั้นๆ ที่กำลังงานสูง
- 3) ระบบ TH-CDMA จะลดผลกระทบที่เกิดจากปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-far effect)

- ข้อเสียของระบบ TH-CDMA

- 1) ใช้เวลาในการซิงโครไนซ์หาค่าและช่วงเวลาในการรับสัญญาณนั้นจะเป็นปัญหาสำหรับการซิงโครไนซ์หาค่าอื่นเนื่องมาจากช่วงเวลาในการรับสัญญาณมีค่าน้อย
- 2) เมื่อมีผู้ใช้ในระบบมากขึ้นอาจเกิดการสูญเสียของข้อมูลได้ ดังนั้นการนำเอารหัสแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลและการวางสลับ (Interleave) จึงมีความจำเป็น

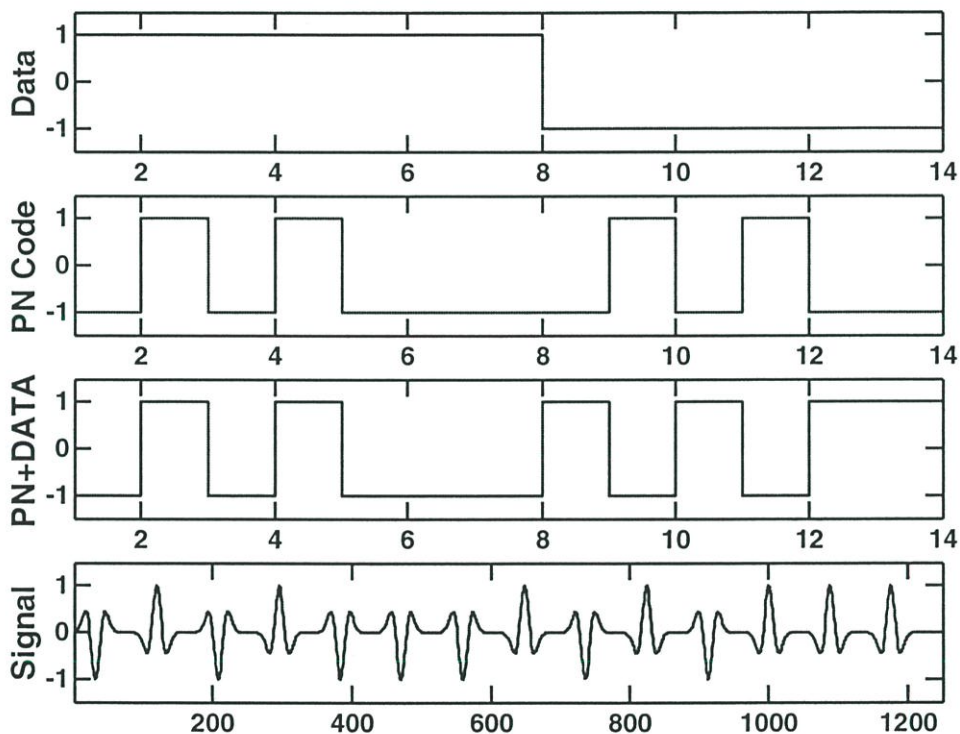
### 2.3.2 วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ DS-CDMA

ในระบบ DS-CDMA สัญญาณข้อมูลจะถูกนำมาผสมกับสัญญาณรหัสแพร่สเปกตรัมโดยตรง โดยที่สัญญาณข้อมูลที่จะนำมาทำการผสมอาจเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณอนาลอกก็ได้ สัญญาณข้อมูลจะถูกนำมาคูณกับสัญญาณรหัสแพร่สเปกตรัมทำให้ได้สัญญาณหลังการผสมสเปกตรัมมีแบนด์วิดท์กว้างกว่าสัญญาณข้อมูล ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้ระบบนี้มีชื่อว่า DS-SS โดยที่ในรูปที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งแบบ DS-SS



รูปที่ 2.7 เครื่องส่งแบบ DS-SS [3]

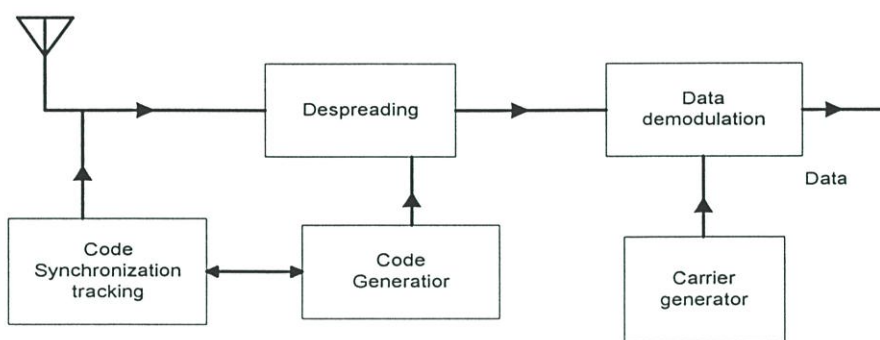
โดยที่ในรูปที่ 2.7 นั้นสัญญาณข้อมูลซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณไบนารีจะถูกมอดูเลตกับสัญญาณแบบอิมพัลส์ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ส่งในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณรหัสแพร่สเปกตรัม โดยที่สัญญาณรหัสแพร่สเปกตรัมนั้นจะประกอบด้วยบิตรหัส หรือ ชิป (Chips) ที่มีค่าเป็น +1 หรือ -1 โดยที่วิธีการมอดูเลตสัญญาณแพร่สเปกตรัมนั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น BPSK D-BPSK QPSK หรือ MPSK เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการมอดูเลตแบบไบเฟสมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยที่สัญญาณที่ได้จากระบบการสื่อสารแบบนี้จะแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของสัญญาณในระบบ DS-SS ในระบบการสื่อสารแบบ UWB

เครื่องรับของสัญญาณในระบบ DS-SS นั้นจะแสดงในรูปที่ 2.9 โดยที่เครื่องรับจะทำการสร้างสัญญาณรหัสแพร่สเปกตรัมจากตัวกำเนิดรหัส เพื่อใช้ในการนำเอาสัญญาณข้อมูลกลับคืนมาจากสัญญาณที่รับได้ โดยกระบวนการนี้จะเรียกว่ากระบวนการดีมอดูเลตสเปกตรัมแผ่ (despread) ซึ่งที่เครื่องรับจะต้องทราบรหัสสัญญาณแผ่ที่ใช้ที่ภาคส่งของระบบการสื่อสารของสัญญาณที่ต้องการ และรหัสที่สร้างได้ที่เครื่องรับและเครื่องส่งจะต้องซิงโครไนซ์กัน โดยที่การซิงโครไนซ์จะต้องเริ่มตั้งแต่รับ

สัญญาณได้และจะต้องซิงโครไนซ์ตลอดจนกระทั่งได้รับสัญญาณหมด ซึ่งส่วนของการซิงโครไนซ์และการติดตามรหัส (Synchronize / tracking code) จะทำหน้าที่ดังกล่าว และหลังจากผ่านกระบวนการดีมอดูเลตสเปกตรัมแผ่ (despread) และดีมอดูเลตแล้วจะได้สัญญาณเดิมกลับคืน



รูปที่ 2.9. เครื่องรับระบบ DS-SS [3]

### 2.3.2.1 คุณสมบัติของระบบ DS-SS

#### 1) การเข้าถึงหลายทาง

เมื่อผู้ใช้งานหลายคนใช้งานช่องสัญญาณพร้อมกันในเวลาเดียวกัน สัญญาณ DS จะเกิดการซ้อนทับกันในทางเวลาและความถี่ ที่เครื่องรับจะทำการดีมอดูเลตสเปกตรัมแผ่ เพื่อนำเอาสัญญาณรหัสแผ่สเปกตรัมออก ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำการรวมกำลังงานของสัญญาณที่ต้องการในช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณข้อมูล และถ้าค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณรหัสแผ่สเปกตรัมที่ต้องการกับสัญญาณรหัสแผ่สเปกตรัมที่ไม่ต้องการมีค่าน้อยแล้ว การตรวจจับแบบร่วมนัย (Coherent detection) จะทำให้กำลังของสัญญาณแทรกสอดมีค่าน้อยในช่วงของแบนด์วิดท์ของสัญญาณข้อมูล

#### 2) การแทรกสอดหลายวิถี

ถ้าลำดับรหัสมีคุณสมบัติอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) เป็นแบบจุดมคติ ซึ่งจะมีค่าเป็น 0 เมื่ออยู่นอกช่วง  $[-T_c, T_c]$  โดยที่  $T_c$  คือคาบเวลาของสัญญาณชิป นั่นคือถ้าสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณหลายวิถีมีการประวิงเวลามากกว่า  $2T_c$  การดีมอดูเลตแบบร่วมนัยจะให้สัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณแทรกสอด ซึ่งจะทำให้กำลังงานในแบนด์วิดท์ของข้อมูลมีขนาดที่ต่ำ

### 3) การแทรกสอดแบบแถบแคบ

การตรวจวัดแบบร่วมนัยที่เครื่องรับจะรวมถึงการคูณสัญญาณที่รับได้ด้วยสัญญาณรหัสแอสเปกตรัมที่สร้างที่ภาครับของระบบการสื่อสาร อย่างไรก็ตามที่ภาคส่งของระบบการสื่อสารเมื่อนำสัญญาณข้อมูลที่มีแบนด์วิดท์น้อยมากคูณกับสัญญาณรหัสแอสเปกตรัมที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก จะทำให้สัญญาณข้อมูลที่ได้มีแบนด์วิดท์เท่ากับสัญญาณที่นำมาคูณ ซึ่งจะส่งผลทำให้กำลังงานของสัญญาณในแบนด์วิดท์มีขนาดลดลงโดยตัวประกอบที่มีค่าเท่ากับอัตราขยายการประมวลผล

จากคุณสมบัติดังกล่าว สามารถสรุปถึงข้อดีและข้อเสียของวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ DS-CDMA ได้ดังนี้

ข้อดีของระบบ DS-CDMA

- 1) ในการสร้างสัญญาณรหัสนั้นสามารถทำได้ง่าย
- 2) สามารถนำไปใช้กับการมอดูเลตแบบร่วมนัยได้
- 3) การชิงโครโนซระหว่างผู้ใช้ไม่มีความจำเป็น

ข้อเสียของระบบ DS-CDMA

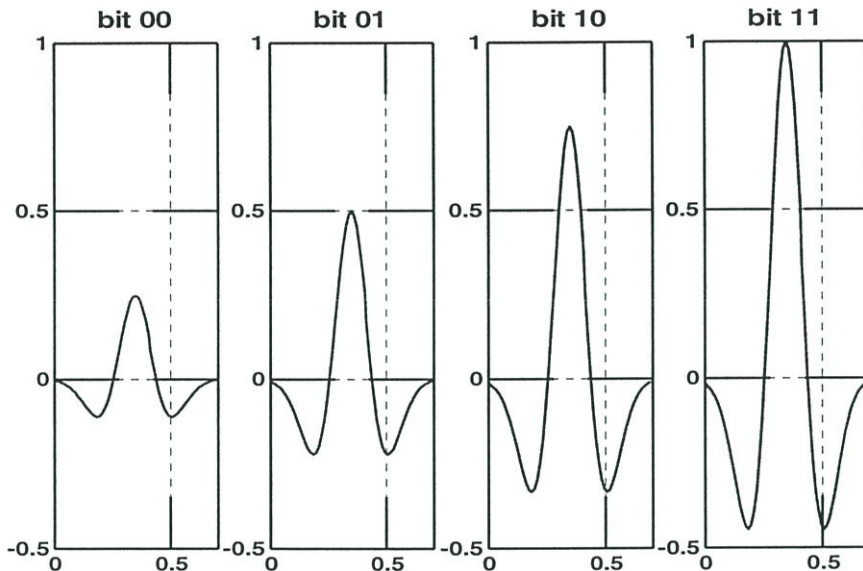
- 1) การได้มา และการรักษาสภาพการชิงโครโนซระหว่างสัญญาณที่รับได้และสัญญาณรหัสทำได้ยาก เนื่องจากคาบเวลาของสัญญาณรหัสมิขนาดที่เล็กมาก
- 2) กำลังสัญญาณที่รับได้ จากผู้ใช้ที่อยู่ใกล้สถานีฐาน (base station) จะมีค่ามากกว่ากำลังของสัญญาณที่อยู่ไกลกว่าทำให้ผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะสร้างสัญญาณแทรกสอดให้กับสัญญาณของผู้ใช้งานที่อยู่ไกลออกไปทำให้รับสัญญาณได้ยากขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะเรียกว่าเกิดผลกระทบของความใกล้-ไกล (Near – far effect) ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีการควบคุมกำลังงาน เพื่อให้ทุกสัญญาณที่รับได้ที่สถานีฐานมีขนาดของกำลังงานที่เท่ากัน

## 2.4 วิธีการมอดูเลตสัญญาณที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบ UWB

ในการส่งสัญญาณข่าวสารในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยั้งนั้นสามารถทำการมอดูเลตได้หลายวิธีแต่ที่นิยมนำมาใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีคือ การมอดูเลตแบบไบเฟส (Bi - Phase Modulation) การมอดูเลตพัลส์แบบตำแหน่ง (Pulse Position Modulation) และการมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามขนาดของสัญญาณ (Pulse Amplitude Modulation) เป็นต้น

### 2.4.1 การมอดูเลตตามขนาด

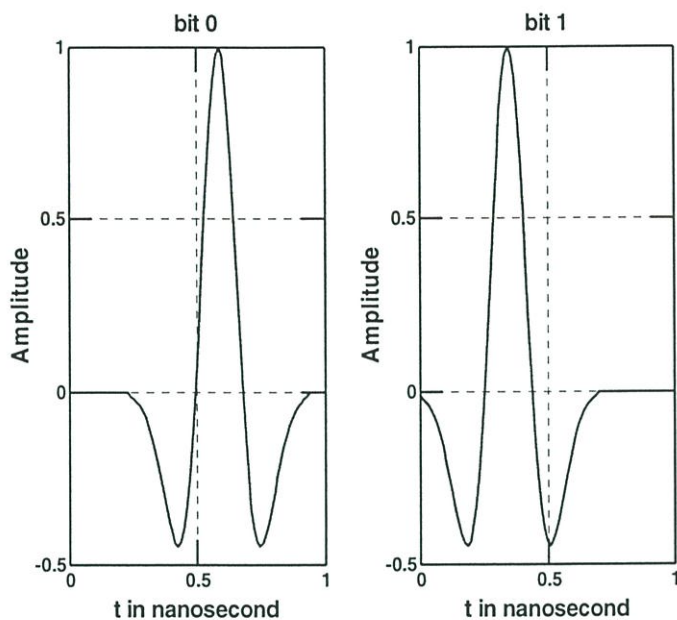
การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามขนาด (PAM) นั้นจะอยู่บนพื้นฐานการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลกับขนาดของสัญญาณพัลส์ โดยที่ในรูปที่ 2.10 แสดงสัญญาณข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาดโดยมีทั้งหมด 4 ระดับ ซึ่งการมอดูเลตตามขนาดนั้นจะมีข้อเสียในด้านอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.10 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามขนาด 4 ระดับ

### 2.4.2 การมอดูเลตตามตำแหน่งพัลส์

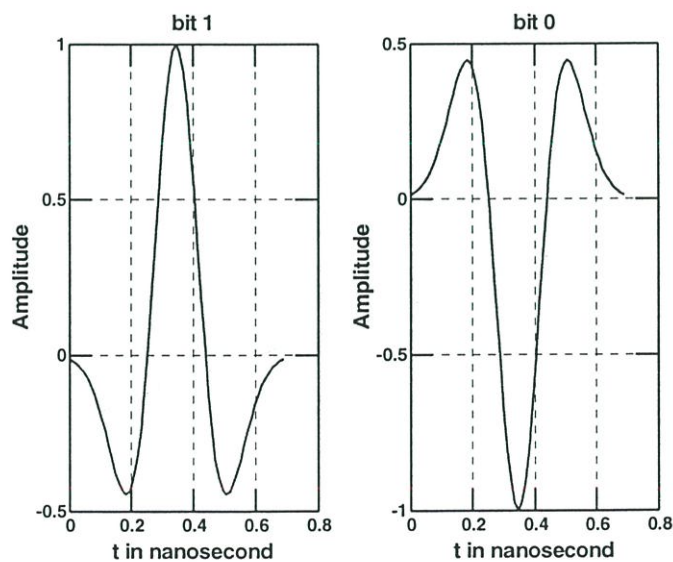
การมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่ง (PPM) นั้นจะทำการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามตำแหน่งของสัญญาณพัลส์โดยที่ตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ที่ใช้แทนสัญญาณข้อมูลสามารถมีได้สองตำแหน่งหรือมากกว่านั้น โดยที่ในรูปที่ 2.11 แสดงการมอดูเลตสัญญาณพัลส์ตามตำแหน่งแบบ 2 ตำแหน่ง โดยที่ในรูปที่ 2.11 นั้นบิต "0" จะแทนตำแหน่งของสัญญาณพัลส์ที่อยู่หลังตำแหน่งปกติ (Nominal- Position) และบิต "1" จะแทนตำแหน่งพัลส์ที่อยู่ก่อนตำแหน่งปกติ โดยช่วงเวลาประวิงเวลาระหว่างตำแหน่งของสัญญาณทั้งสองต้องมีค่าที่มากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการแทรกสอดกันระหว่างสัญญาณอิมพัลส์



รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบพัลส์ตามตำแหน่ง (PPM)

### 2.4.3 การมอดูเลตแบบไบเฟส

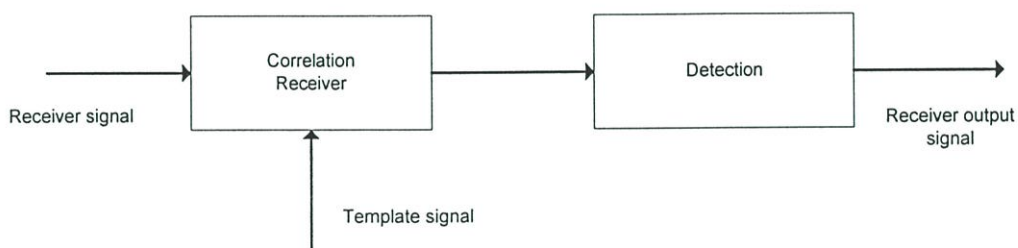
การมอดูเลตสัญญาณแบบไบเฟสนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของการเข้ารหัสสัญญาณข้อมูลตามเฟสของสัญญาณพัลส์โดยในกรณีนี้จะแทนสัญญาณข้อมูลหนึ่งบิตด้วยสัญญาณพัลส์หนึ่งลูกคลื่น ซึ่งการมอดูเลตสัญญาณพัลส์แบบไบเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12. สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบไบเฟส

## 2.5 เครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

เครื่องรับสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นโดยปกติแล้วจะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ซึ่งหลักการของเครื่องรับประเภทนี้จะทำการนำเอาสัญญาณข่าวสารที่ส่งผ่านช่องสัญญาณมาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณต้นแบบ (Template signal) เพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทั้ง 2 โดยที่บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง จะแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับในระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้น จะใช้สัญญาณพัลส์มากกว่า 1 รูปคลื่นสัญญาณ ดังนั้นที่ภาครับของระบบจะต้องใช้จำนวนของสัญญาณพัลส์ที่เท่ากันในการตัดสินใจว่าข้อมูลที่รับได้เป็นบิต 1 หรือ บิต 0 ที่ภาคตรวจจับสัญญาณ (Detection)

## 2.6 สรุป

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเป็นระบบการสื่อสารที่ได้รับความนิยมที่จะใช้ในระบบการสื่อสารที่ต้องการอัตราส่งข้อมูลที่สูง เนื่องจากระบบการสื่อสารประเภทนี้ใช้แบนวิidthในการส่งข้อมูลที่มีขนาดที่กว้างมาก โดยระบบการสื่อสารประเภทนี้จะไม่มีการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณพาห้ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้เครื่องส่งกำลังสูง ซึ่งส่งผลทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับในระบบการสื่อสารนี้ใช้ต้นทุนที่ต่ำ สัญญาณที่ใช้ในการส่งในระบบการสื่อสารประเภทนี้จะใช้สัญญาณพัลส์ที่มีคาบสัญญาณที่สั้นมากในการส่งข้อมูล โดยที่การส่งข้อมูลเข้าสู่ช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารที่มีผู้ใช้บริการหลายคน นั้นโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ วิธีก้าวกระโดดทางเวลา และการจัดลำดับโดยตรง ในส่วนของการมอดูเลตสัญญาณในระบบการสื่อสารนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ การมอดูเลตทางขนาด การมอดูเลตตามตำแหน่ง และการมอดูเลตแบบไบเฟส และในส่วนของเครื่องรับในระบบการสื่อสารประเภทนี้โดยส่วนใหญ่แล้ว จะใช้

เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ซึ่งโดยหลักการของเครื่องรับประเภทนี้จะทำการหาค่าความสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณต้นแบบ เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าข้อมูลที่รับได้เป็นบิต 1 หรือ บิต 0 ตามลำดับ จากการศึกษาที่ระบบการสื่อสารนี้สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง ดังนั้นระบบการสื่อสารประเภทนี้จึงถูกนำเสนอให้ใช้ในระบบเครือข่ายส่วนบุคคลไร้สาย ระบบเครือข่ายเฉพาะที่แบบไร้สาย และระบบการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย เป็นต้น

## บทที่ 3

# รหัสแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล

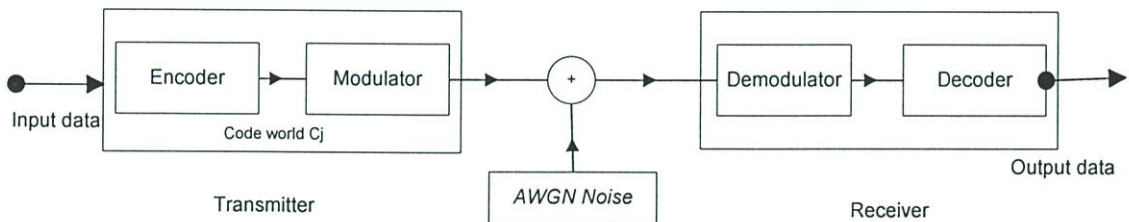
### 3.1 บทนำ

ในการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารนั้น สัญญาณข้อมูลที่ส่งออกไปในระบบจะถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดในระบบการสื่อสาร นอกจากนี้ยังมีผลกระทบที่เกิดจากการที่เส้นทางในการเดินทางของสัญญาณจากภาคส่งมาถึงภาครับมีมากกว่าหนึ่งเส้นทาง (Multipath) ทำให้สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับของระบบการสื่อสารมีมากกว่าหนึ่งสัญญาณ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณที่ภาครับของระบบการสื่อสาร (Intersymbol interference: ISI) และองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งทำให้สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับเกิดการผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณที่ส่ง โดยจะส่งผลทำให้ความผิดพลาดของบิตที่ภาครับของระบบการสื่อสารเพิ่มขึ้น จึงได้มีการนำเอาเทคนิคต่างๆ มาใช้ร่วมกับระบบการสื่อสารเพื่อทำให้ข้อมูลที่รับได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เทคนิคหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการลดอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate : BER) ที่รับได้ที่ภาครับคือการนำเอารหัสแก้ไขความผิดพลาด (Error correcting codes) มาใช้เพื่อเป็นการลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสาร ซึ่งทำให้อัตราความผิดพลาดบิต (Bits Error Rate: BER) ที่เกิดขึ้นในระบบลดลง

### 3.2 หลักการพื้นฐานของการเข้ารหัส

การเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นมีจุดประสงค์เพื่อลดอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่รับได้ที่ภาครับของระบบการสื่อสาร โดยปราศจากการเพิ่มกำลังส่งสัญญาณที่ภาคส่ง ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นจะทำการเพิ่มข้อมูลที่จะทำการส่ง โดยที่วัตถุประสงค์ของข้อมูลที่เพิ่มขึ้นนั้นจะใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของข้อมูลที่เกิดการผิดพลาดและทำการแก้ไขข้อมูลที่ผิดให้ถูกต้อง โดยในการเข้ารหัสช่องสัญญาณจะทำการเข้ารหัสข้อมูลก่อนทำการส่งผ่านเข้าสู่ช่องสัญญาณ ในการเข้ารหัสนั้นข้อมูลดิจิทัล ( $d_i$ ) ที่ต้องการส่งจะถูกนำไปเข้าสู่วงจรเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Encoding) เพื่อทำการเปลี่ยนข้อมูลให้เป็นคำรหัส (Code word :  $c_i$ ) ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ  $n$  บิต และรูปแบบของคำรหัสจะเป็นส่วนของสัญญาณที่ถูกส่งออกไปในช่องสัญญาณของระบบการสื่อสาร สำหรับที่ภาครับของระบบการสื่อสาร สัญญาณที่รับได้จะผ่านกระบวนการถอดรหัสช่องสัญญาณ (Decoding) ซึ่งจะมีหน้าที่ในการเปลี่ยนคำรหัส (Codes word) กลับไปเป็นสัญญาณข้อมูลที่ส่งมา โดยที่ในกระบวนการนี้จะทำการตรวจจับและแก้ไขข้อมูลในตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดขึ้น ในรูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารที่มีการนำเอาการ

เข้ารหัสช่องสัญญาณมาใช้ โดยทั่วไปแล้วอัตราการเกิดความผิดพลาดของบิตข้อมูลจะเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR) หรือค่าพลังงานของบิตข้อมูลต่อพลังงานของสัญญาณรบกวน (Energy bit per noise power :  $\frac{E_B}{N_0}$ ) โดยที่ในระบบการสื่อสารที่นำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาใช้นั้นจะพบว่าในระดับอัตราการผิดพลาดบิตเดียวกันแล้ว ระบบที่ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาดจะต้องการค่า SNR ที่น้อยกว่าระบบที่ไม่ใช้การเข้ารหัส ซึ่งค่าความแตกต่างของค่า SNR ของระบบทั้งสองที่ระดับ BER เดียวกันจะถูกเรียกว่า อัตราขยายการเข้ารหัส (Coding gain) และค่านี้จะเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการเข้ารหัสแบบต่างๆ เนื่องจากการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้น คาร์หัส  $c_i$  ที่ได้จากวงจรเข้ารหัสจะมีขนาดที่มากกว่าข้อมูลที่ต้องการส่งจริง  $d_i$  จึงทำให้ระบบที่มีการนำเอาวิธีการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาใช้นั้นมีความต้องการแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้น หรือ ต้องทำการลดอัตราการส่งข้อมูลลงให้เหมาะสมกับแถบความถี่ที่ใช้ในการส่งข้อมูล และได้มีการนิยามอัตราการเข้ารหัส (Code Rate; R) ขึ้นเพื่อแสดงอัตราส่วนระหว่างขนาดของข้อมูลดิบทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่วงจรการเข้ารหัสกับขนาดทั้งหมดของข้อมูลคาร์หัสทั้งหมดที่ได้จากการทำงานของภาคเข้ารหัส ( $R = k/n$ )



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบการสื่อสารที่นำวิธีการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้

### 3.3 วิธีการเข้ารหัสแบบต่างๆ

รูปแบบของวิธีการเข้ารหัสนั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีจะมีประสิทธิภาพที่ต่างกันไปตามชนิดของวิธีการเข้ารหัส โดยที่วิธีการเข้ารหัสช่องสัญญาณเพื่อทำการแก้ไขข้อมูลนั้นโดยทั่วไปจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การเข้ารหัสแบบบล็อก (Block codes) และการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution codes) โดยข้อแตกต่างระหว่างวิธีการเข้ารหัสทั้งสองประเภทคือจำนวนข้อมูลที่ทำการส่งเข้ามาที่ภาคเข้ารหัส ซึ่งวิธีการเข้ารหัสแบบบล็อกนั้นจะทำการแบ่งข้อมูลที่ต้องการส่งออกเป็นบล็อกของข้อมูลขนาด  $k$  บิต เพื่อนำไปทำการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบบล็อก โดยที่ค่าที่ได้จากวงจรเข้ารหัสจะได้เป็นคาร์หัสที่มี

ขนาดความยาวเท่ากับ  $n$  บิต ดังนั้นอัตราการใช้รหัสแบบบล็อกจะมีค่าเท่ากับ  $k/n$  ในขณะที่การเข้ารหัสประเภทคอนโวลูชันจะแตกต่างกับการเข้ารหัสในลักษณะบล็อกตรงที่ ข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสไม่จำเป็นต้องนำมาแบ่งออกเป็นบล็อกที่มีขนาดความยาวที่ตายตัวก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการเข้ารหัสของสัญญาณ ดังนั้นในการเข้ารหัสประเภทนี้จึงสามารถทำการส่งข้อมูลเข้าสู่วงจรเข้ารหัสได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรูปแบบการเข้ารหัสที่สำคัญ ได้แก่ รหัสแบบบล็อก รหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบพื้นฐานของการเข้ารหัสของสัญญาณ รหัสแบบเทอร์โบซึ่งเป็นวิธีการเข้ารหัสที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งใช้หลักการถอดรหัสแบบวนซ้ำ และรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ ซึ่งเป็นการนำเอาการเข้ารหัสแบบบล็อกมาทำงานร่วมกับหลักการทำงานของวิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำ (Iterative decoding) โดยผลที่ได้คือการเข้ารหัสประเภทนี้จะให้ผลดีในด้านของค่า minimum distance  $(d_{\min})$  และความซับซ้อนของวิธีการถอดรหัสที่ลดลง ซึ่งรายละเอียดของรหัสของสัญญาณแบบต่างๆ จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 3.3.1 รหัสแบบบล็อก

รหัสแบบบล็อก เป็นรูปแบบการเข้ารหัสที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ โดยที่ข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกข้อมูลขนาดเท่ากับ  $k$  บิต ซึ่งสามารถแทนด้วยสัญลักษณ์  $d_0, d_1, \dots, d_{k-1}$  และในการเข้ารหัสจะนำเอาข้อมูลครั้งละ  $k$  บิตไปใช้ในการสร้างบิตพาริตีจำนวน  $n - k$  ซึ่งเป็นข้อมูลที่เพิ่มเข้าไปเพื่อใช้ในการแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของช่องสัญญาณ โดยสามารถแทนได้ด้วย สัญลักษณ์  $b_0, b_1, \dots, b_{n-k-1}$  และเมื่อนำเอาบิตข้อมูลและบิตพาริตีจำนวน  $n - k$  มาประกอบกันได้เป็นคำรหัส  $c_0, c_1, \dots, c_{n-1}$  ซึ่งถ้าแสดงในรูปของสมการความสัมพันธ์จะได้ผลดังนี้

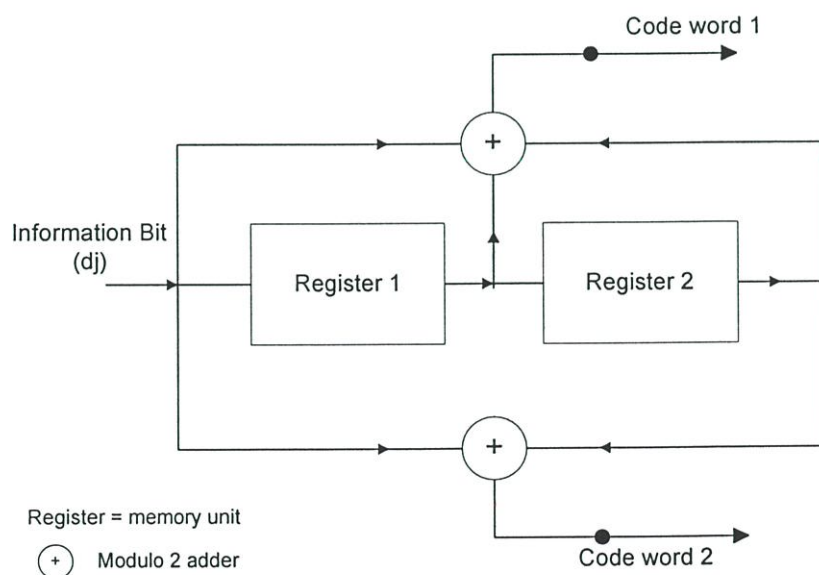
$$c_i = \begin{cases} b_i & i = 0, 1, \dots, n - k - 1 \\ d_{i+k-n} & i = n - k, n - k + 1, \dots, n - 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

โดยที่คำรหัสที่สร้างขึ้นนั้นจะมีความยาวเท่ากับ  $n$  บิต และในส่วนของภาคถอดรหัส จะมีการนำเอาข้อมูลที่รับได้ครั้งละ  $n$  บิต มาทำการคำนวณและตรวจจับความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้ รวมทั้งทำการแก้ไขข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดขึ้นและนำเอาข้อมูลที่ได้จากกระบวนการทำงานนี้ไปเป็นผลลัพธ์ของวงจรในภาคถอดรหัส โดยที่รหัสแบบบล็อกที่นิยมนำมาใช้งานจะมีอยู่ด้วยกันหลายแบบเช่น รหัสแบบไซคลิก (Cyclic code) ซึ่งเป็นรหัสแบบบล็อกที่มีคุณสมบัติไซคลิก (cyclic property) และคุณสมบัติการเป็นเชิงเส้น (linearity property) โดยที่การเข้ารหัสแบบไซคลิก นั้นสามารถสร้างได้โดยการนำเอาวงจรซีพรีจิสเตอร์จำนวนหนึ่งที่ต่อเชื่อมกันโดยมีการ

ป้อนกลับ หรือ ที่เรียกว่า LFSR (Linear Feedback Shift Register) และเนื่องจากรหัสประเภทนี้มีโครงสร้างที่ชัดเจน ดังนั้นวิธีการในการถอดรหัสนี้จึงไม่ซับซ้อน รหัส BCH ( Bose, Chaudhuri and Hocquenghem) [4], [5] ซึ่งเป็นกลุ่มของรหัสไซคลิก ประเภทหนึ่งซึ่งมีความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดแบบสุ่มหลายบิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรหัส Reed-Solomon (RS-code) [6] ที่เป็นกลุ่มของรหัสแบบ BCH ที่ไม่ใช่รหัสไบนารี เป็นต้น

### 3.3.2 รหัสแบบคอนโวลูชัน

รหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution code) ได้รับการพัฒนาครั้งแรกในปี 1955 โดย P. Elias [7] โดยที่โครงสร้างแตกต่างจากการทำงานของรหัสแบบบล็อกตรงที่ภาคของการเข้ารหัสไม่ต้องทำการแบ่งบล็อกข้อมูลแต่อย่างใด และสามารถป้อนชุดบิตของข้อมูลขนาดความยาวเท่าใดก็ได้เข้าสู่วงจรเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน และผลลัพธ์ที่ได้จากภาคเข้ารหัสนั้นจะมีความยาวเป็นจำนวนเท่าของชุดบิตข้อมูลที่ป้อนเข้า โดยในภาคของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน จะมีการนำเอาข้อมูลอินพุตในอดีตส่วนหนึ่งที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำมาทำการคำนวณรวมกับข้อมูลอินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสในปัจจุบันเพื่อคำนวณหาคำรหัส (Code word) โดยโครงสร้างโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งส่วนประกอบของภาคเข้ารหัสจะประกอบด้วย อุปกรณ์ประเภทหน่วยความจำ หรือ ชิฟรึจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลอินพุตในอดีต และวงจรบวกแบบมอดูโลสองที่มีการทำงานเหมือนกับ Exclusive –OR



รูปที่ 3.2 การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ( $G = [7_8, 5_8]$ ,  $K = 3$ )

โดยในการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะมีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณลักษณะของวงจรมีอยู่ 3 ค่าได้แก่  $n$ ,  $k$  และ  $K$  โดย

$K$  คือ ค่า Constraint length ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงจำนวนชุดของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ

$k$  คือ จำนวนของบิตต่อหนึ่งสัญลักษณ์

$n$  คือ จำนวนบิตของคำรหัสที่ขาออกของวงจรเข้ารหัส

ซึ่งในรูปที่ 3.2 เป็นตัวอย่างของวงจรเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการนำเอาข้อมูลข่าวสารมาทำการคำนวณเพื่อหาคำรหัสครั้งละ 1 บิต โดยที่หลังจากที่ได้รับข้อมูลเข้ามานั้น ข้อมูลข่าวสารที่ผ่านการประมวลผลแล้วจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำ และจะถูกเลื่อนตำแหน่งไปเก็บไว้ในหน่วยความจำชุดต่อไป ซึ่งจะนำข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำทั้ง 2 บิตมาใช้ในการคำนวณหาคำรหัส โดยที่วงจรวกที่ใช้จะมีลักษณะที่เรียกว่าวงจรการบวกแบบมอดูโลสอง จากรูปที่ 3.2 คำคำรหัสที่ได้ในแต่ละเอาท์พุทนั้นจะมีลักษณะการทำงานดังนี้

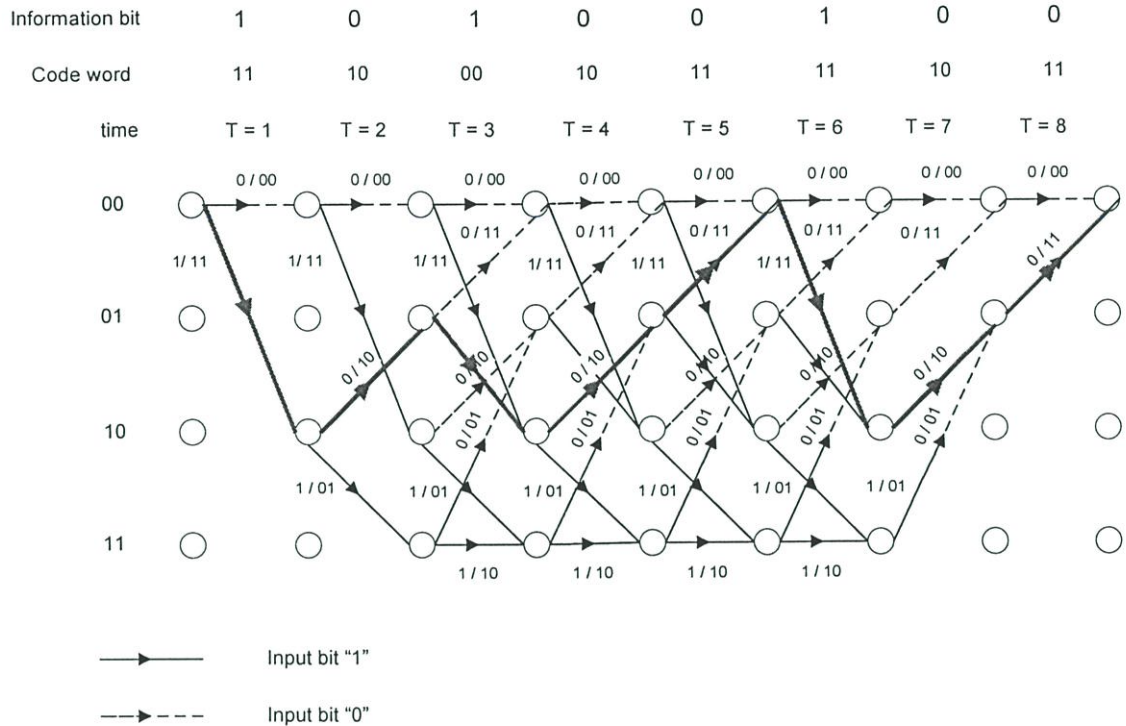
$$C_i^0 = d_i \oplus d_{i-1} \oplus d_{i-2} \quad (3.2)$$

$$C_i^1 = d_i \oplus d_{i-2} \quad (3.3)$$

โดยทั่วไปแล้วในการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน จะอธิบายโดยใช้เมตริกซ์ก่อกำเนิด (Generator matrix :G) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะในการคำนวณหาคำคำรหัส ในการแสดงค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิดจะถูกแสดงด้วยตัวเลขฐานแปด และค่าเมตริกซ์ ก่อกำเนิดของภาคเข้ารหัสในรูปที่ 3.2 นั้นสามารถเขียนเป็นสมการที่ได้ดังนี้

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [7_8 \quad 5_8] \quad (3.4)$$

ในกรณีของวงจรเข้ารหัสในรูปที่ 3.2 นั้นจะมีค่า Constraint Length (K) เท่ากับ 3 และในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน จะสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่ การอธิบายการทำงานของภาคเข้ารหัสในลักษณะของแผนภาพสภาวะ (State diagram) แผนภาพต้นไม้ (Tree diagram) และแผนภาพ Trellis (Trellis diagram) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วในการแสดงสภาวะการทำงานของวงจรเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะอธิบายได้โดยใช้ แผนภาพ Trellis ซึ่งแผนภาพนี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำกับข้อมูลที่ทำกรป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัส และข้อมูลที่ออกจากภาคเข้ารหัสที่เวลาหนึ่งๆ โดยที่ลักษณะของแผนภาพ Trellis จะแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นตัวอย่างของแผนภาพแบบ Trellis ที่ใช้ในวงจรเข้ารหัสในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แผนภาพ Trellis เมื่อค่า Generator matrix เป็น  $[7_8 \ 5_8]$

โดยที่ในรูปที่ 3.3 เป็นแผนภาพ Trellis เมื่อกำหนดให้ค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิด มีค่าเท่ากับ  $[7_8 \ 5_8]$  เมื่อกำหนดความยาวของข้อมูลเท่ากับ 6 บิต และมีการเพิ่มบิตทางอีก 2 บิต สุดท้าย โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ข้อมูลที่ถูเก็บไว้ในหน่วยความจำมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งสามารถทำได้โดยการป้อนอินพุต บิต "0" เข้าไปในวงจรเข้ารหัสของสัญญาณ สำหรับจุด ๆ ใด ในแผนภาพ Trellis นั้นจะแสดงถึงข้อมูลดิจิทัลที่เป็นไปได้ ทั้งหมดที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยจำของภาคเข้ารหัส ในช่วงเวลาใดๆ และเส้นทางที่ลากเชื่อมระหว่างจุดสองจุดใดๆ จะแสดงถึงข้อมูลอินพุตและข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์ของวงจรการเข้ารหัส ณ เวลาหนึ่งๆ ซึ่งจะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $(d_i / C_{i,1} C_{i,2})$  โดยค่านี้จะแสดงถึงทิศทางในการเปลี่ยนแปลงของหน่วยความจำของวงจรการเข้ารหัส โดยที่จุดที่ต้นทางของแผนภาพ Trellis จะบอกถึงสถานะของหน่วยความจำในเวลาปัจจุบัน และจุดที่ปลายทางของเส้นจะแสดงถึงสถานะของหน่วยความจำเมื่อมีการป้อนข้อมูล  $d_i$  ที่เวลาใดๆ และ  $C_{i,1}, C_{i,2}$  เป็นค่ารหัสที่ได้จากการเข้ารหัสทั้งสองที่เวลาหนึ่ง ๆ เมื่อกำหนดสถานะเริ่มต้นของหน่วยความจำและข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่ภาคเข้ารหัส ในการถอดรหัสแก้ไขความผิดพลาดของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น วิธีการถอดรหัสแบบ Sequential และวิธีการถอดรหัสแบบ Viterbi เป็นต้น

สำหรับวิธีการถอดรหัสที่นิยมใช้สำหรับรหัสแบบคอนโวลูชันคือ วิธีการถอดรหัสแบบ Viterbi ซึ่งเป็นวิธีการถอดรหัสที่มีประสิทธิภาพและความซับซ้อนของวิธีการที่ไม่มาก โดยที่วิธีในการถอดรหัสประเภทนี้จะนำเอาแผนภาพ Trellis มาใช้ในการประมวลผลหาค่าข้อมูลที่เป็นไปได้มากที่สุดที่ถูกส่งออกไปสู่ช่องสัญญาณ โดยที่วิธีการถอดรหัสแบบนี้จะนำเอาคํารหัสที่รับได้ที่เวลา  $t$  ใดๆ มาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของแต่ละเส้นทางในแผนภาพ Trellis เพื่อทำการคำนวณหาเส้นทางใด ๆ ที่มีลักษณะที่เป็นไปได้มากที่สุดกับสัญญาณที่ตรวจจับได้ ซึ่งในการเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในแต่ละเส้นทางจะสามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่า Euclidean distance ระหว่างสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณในแผนภาพ Trellis โดยที่เส้นทางไหนมีค่า Euclidean distance น้อยที่สุดจะสอดคล้องกับค่าที่เส้นทางนั้นจะเป็นเส้นทางที่ถูกต้องมากที่สุด และหลังจากที่ทราบเส้นทางของแผนภาพ Trellis ที่ใช้ในการเข้ารหัสแล้ว จะทำการหาค่าของข้อมูลที่น่าจะเป็นข้อมูลที่ส่งเข้าสู่วงจรเข้ารหัสที่เป็นไปได้มากที่สุด เพื่อใช้เป็นข้อมูลผลลัพธ์ของวงจรถอดรหัส โดยที่หลักการการทำงานของ Viterbi Decoding จะทำการหาเส้นทางที่เป็นไปได้มากที่สุดในการเข้ารหัสของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ภาคส่ง จากข้อมูลที่ได้รับได้จากภาครับของระบบการสื่อสาร

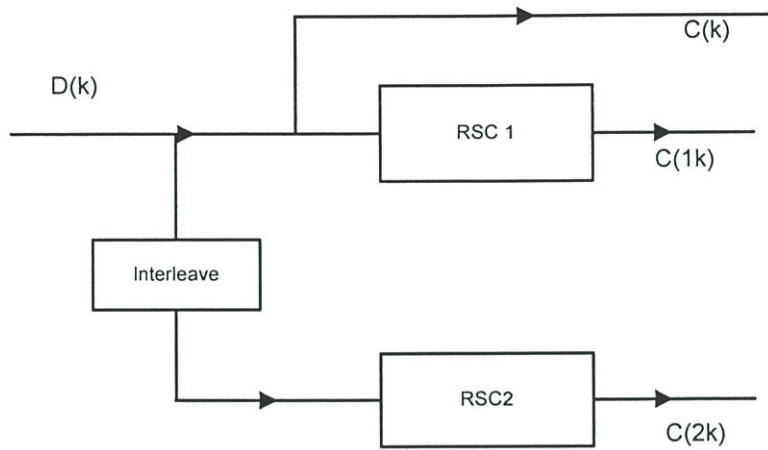
### 3.3.3. รหัสแบบเทอร์โบ

รหัสแบบเทอร์โบเป็นวิธีการถอดรหัสประเภทใหม่ที่ได้ถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกในปี 1993 โดย C. Berrou, A. Glavieux และ P. Thitimajshima [1] โดยที่รหัสแบบเทอร์โบจะมีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถทำงานได้ดีแม้ว่าช่องสัญญาณจะมีค่าอัตราส่วน  $E_b/N_0$  ที่มีค่าต่ำ และมีความสามารถในการจัดการปัญหาความผิดพลาดของข้อมูล อันเนื่องมาจากความไม่เป็นอุดมคติของช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่หลักการการทำงานของรหัสแบบเทอร์โบคือการนำเอาการเข้ารหัสแบบ Recursive Systematic Convolution Code 2 ตัวมาทำงานร่วมกันในลักษณะของการต่อแบบขนาน (Parallel Concatenate) เพื่อใช้เป็นภาคเข้ารหัสแบบเทอร์โบ และในส่วนของภาคถอดรหัสนั้นจะใช้วิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำ โดยที่รายละเอียดของรหัสแบบเทอร์โบจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

#### 3.3.3.1 วิธีการเข้ารหัสแบบเทอร์โบ

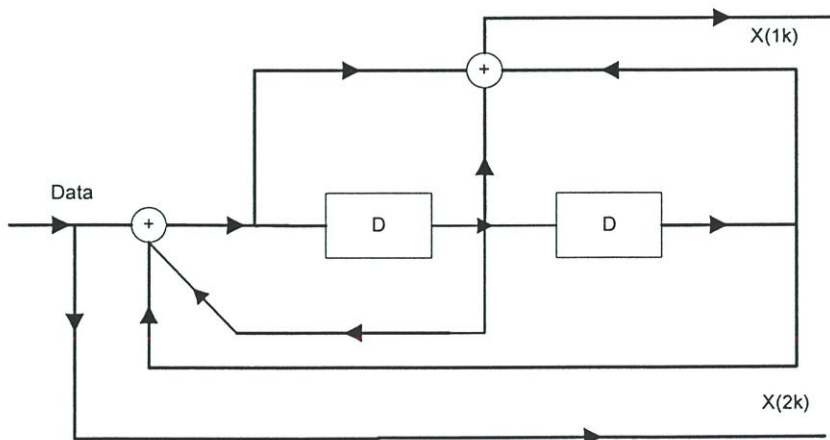
วงจรเข้ารหัสแบบเทอร์โบนั้นจะมีโครงสร้างการทำงานพื้นฐานตามรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วยวงจรเข้ารหัสแบบ Recursive Systematic Convolution (RSC) สองวงจรมาทำงานร่วมกันโดยจะนำเอาวงจรเข้ารหัสทั้งสองมาต่อกันแบบวงจรถนนาน (Parallel concatenated) โดย

ที่ข้อมูลที่เข้าสู่วงจรเข้ารหัสตัวที่หนึ่งนั้นจะเป็นข้อมูลอินพุต ส่วนข้อมูลที่เข้าสู่วงจรการเข้ารหัสตัวที่สองนั้นจะเป็นข้อมูลอินพุตที่ผ่านกระบวนการวางสลับ (Interleave)



รูปที่ 3.4 วงจรการเข้ารหัสแบบเทอร์โบ

โดยการเข้ารหัสแบบ concatenate คือการนำเอาวงจรเข้ารหัสของสัญญาณทั้ง 2 วงจรมาทำงานร่วมกันเพื่อให้ได้รูปแบบการเข้ารหัสข้อมูลที่มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น โดยไม่มีการใช้รูปแบบของวงจรที่ซับซ้อน ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเอาการเข้ารหัสแบบ Recursive Systematic Convolution Code (RSC) มาใช้ซึ่งเป็นการเข้ารหัสที่ได้พัฒนามาจากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน โดยที่มีการนำเอาข้อมูลที่ออกมาจากวงจรเข้ารหัสที่หนึ่งมาทำการป้อนกลับมาเป็นข้อมูลอินพุต ซึ่งการเข้ารหัสแบบ RSC นั้นจะแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5. วงจรเข้ารหัสแบบ RSC

ในรูปที่ 3.5 แสดงวงจรเข้ารหัสแบบ RSC ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  นั่นคือทุกครั้งที่มีข้อมูลอินพุต 1 บิต ( $k=1$ ) เข้าสู่วงจรเข้ารหัสจะให้ข้อมูลเอาต์พุตจำนวน 2 บิต ( $n=2$ ) โดยที่ข้อมูลที่ได้จากวงจรการเข้ารหัสนั้นจะมีการนำเอาผลของชุดข้อมูลในอดีตและข้อมูลที่ป้อนกลับจากภาคเอาต์พุตของวงจรการเข้ารหัสมาคิดด้วย โดยถ้าข้อมูลที่เข้าสู่วงจรการเข้ารหัสเป็น

$$d = (\dots d_{-1}, d_0, d_1, \dots) \quad (3.5)$$

ข้อมูลที่ได้จากวงจรเข้ารหัสจะมีอยู่สองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งคือข้อมูลที่ออกจากวงจรเข้ารหัสที่เหมือนกับตัวข้อมูลที่นำเข้าสู่วงจรการเข้ารหัส นั่นคือ  $y_k$  ซึ่งเป็นรูปแบบของการเข้ารหัสแบบ Systematic และในส่วนที่สองนั้นจะได้ออกจากการนำเอาข้อมูลที่เข้าสู่วงจรการเข้ารหัสและส่วนของข้อมูลที่ป้อนกลับจากภาคเข้ารหัสตัวที่ 1 มาหาข้อมูลขาออกของวงจร ( $x_k$ ) โดยที่สมมติให้  $A_k$  คือส่วนของข้อมูลที่ได้จากวงจรเข้ารหัส และเอาต์พุตของภาคเข้ารหัสสามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$y_k = \sum_{i=0}^{K-1} g_i^2 A_{k-i} \quad \text{mod } 2 \quad (3.6)$$

โดยที่  $g_i$  คือค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิด (Generator matrix) และค่า  $A_k$  นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (3.7)

$$A_k = d_k + \sum_{i=0}^{K-1} g_i^1 A_{k-i} \quad \text{mod } 2 \quad (3.7)$$

ในรูปที่ 3.5 นั้นสามารถหาค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิดได้ตามสมการที่ (3.8) โดยที่ตัวแปร  $D$  เป็นตัวแปรซึ่งสัมพันธ์กับค่าหน่วงเวลาของภาคเข้ารหัส (unit delay operation) โดยจะดูได้จากสมการที่ (3.8) โดยที่เครื่องหมายบวกในสมการจะแทนการทำงานแบบมอดูโลสอง ซึ่งจะให้ผลที่สอดคล้องกับ XOR และค่า  $K$  ที่พบในสมการที่ (3.6) และ (3.7) เป็นค่า constraint length ซึ่งแสดงถึงจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่จะถูกนำมาพิจารณาในการคำนวณหาค่าข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัส ณ เวลาต่างๆ

$$\begin{aligned} g_1(D) &= 1 + D + D^2 \\ g_2(D) &= 1 + D^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

จากรูปที่ 3.5 นั้นสามารถแสดงค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิดในรูปทั่วไปได้ในสมการที่ (3.9) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิดของวงจรเข้ารหัสแบบ RSC สำหรับการเข้ารหัสแบบเทอร์โบนั้นจะเหมือนกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิดของภาคเข้ารหัสแบบ RSC ทั้งสองนั้นสามารถมีค่าที่แตกต่างกันได้

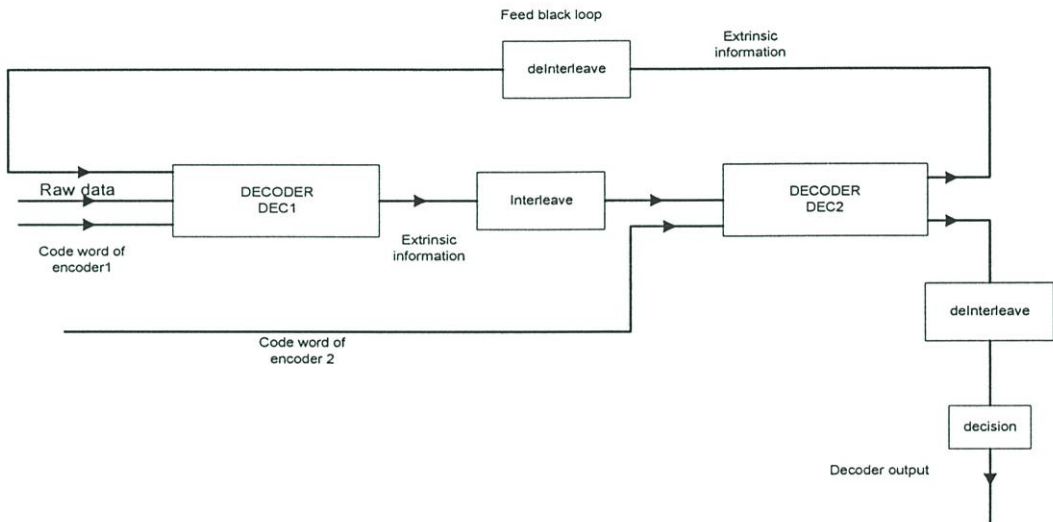
$$g_{RSC} = \begin{bmatrix} 1 & g_2 \\ & g_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1+D^2}{1+D+D^2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

โดยที่ข้อมูลที่เข้าสู่วงจรเข้ารหัสแบบ RSC ตัวที่สองนั้นจะเป็นข้อมูลที่ผ่านกระบวนการสับเปลี่ยนลำดับของข้อมูลก่อนที่จะทำการเข้ารหัส ซึ่งกระบวนการนี้มีจุดประสงค์เพื่อจะทำให้ข้อมูลที่เข้าสู่ภาคการเข้ารหัสแบบ RSC นั้นมีความสัมพันธ์กันให้น้อยที่สุดเพื่อที่จะได้นำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการถอดรหัสแบบวนซ้ำ

### 3.3.3.2 วิธีการถอดรหัสแบบเทอร์โบ

การถอดรหัสของวงจรเข้ารหัสแบบเทอร์โบจะแตกต่างจากวิธีการถอดรหัสสำหรับการเข้ารหัสของสัญญาณแบบอื่นกล่าวคือ การถอดรหัสสำหรับการเข้ารหัสแบบเทอร์โบนั้น จะนำเอาวิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำมาใช้ โดยที่วิธีการถอดรหัสแบบนี้จะมีการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการถอดรหัสในครั้งแรกมาทำการปรับปรุงการถอดรหัสในครั้งต่อไป โดยค่าที่ทำการป้อนกลับมาจากการถอดรหัสในครั้งก่อนนั้นจะนำมาปรับปรุงค่าของความน่าจะเป็นของข้อมูลที่คาดว่าได้ทำการส่งมา ณ เวลาต่างๆ โดยค่าที่ส่งออกมาจากวงจรการถอดรหัสในครั้งก่อน ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการถอดรหัสจะเรียกว่า ค่า extrinsic information โดยที่ทุกครั้งที่มีการวนซ้ำในการถอดรหัสนั้นจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และเมื่อกระบวนการถอดรหัสนั้นได้ทำการวนซ้ำครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ ภาคการถอดรหัสจะทำการคำนวณหาค่า Log A Posteriori Probability (LAPP) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจว่าข้อมูลที่ถูกส่งมามีค่าเป็นหนึ่งในสอง โดยที่หลักการของการถอดรหัสแบบวนซ้ำนั้นจะแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรถอดรหัส 2 ชุด และถูกขั้วกลางด้วยวงจรสับเปลี่ยนข้อมูล เมื่อข้อมูลเข้ามาที่ภาคถอดรหัสนั้นข้อมูลในส่วนที่ได้จากวงจรเข้ารหัสจะถูกมัลติเพล็กซ์ ไปที่วงจรถอดรหัสที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากวงจรการเข้ารหัสในแต่ละตัว ซึ่งข้อมูลที่ได้จากวงจรเข้ารหัสชุดที่หนึ่งซึ่งเป็นค่า extrinsic information นั้นจะต้องผ่านกระบวนการสับเปลี่ยนลำดับของข้อมูลที่สอดคล้องกันในส่วนของภาคเข้ารหัสก่อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสชุดที่สอง เพื่อที่จะทำให้ข้อมูลที่ส่งจาก

การถอดรหัสชุดแรกมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่เข้าสู่วงจรถอดรหัสชุดที่สอง และค่า extrinsic information ที่ได้จากวงจรถอดรหัสชุดที่สองนั้นจะต้องผ่านกระบวนการ Deinterleave ก่อนเพื่อที่จะได้ค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลที่เข้าสู่วงจรถอดรหัสชุดที่หนึ่ง โดยที่วิธีการถอดรหัสในแต่ละวงจรถอดรหัสจะใช้วิธีการแบบ สัญลักษณ์ต่อสัญลักษณ์ เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าความน่าจะเป็นในเกิดการผิดพลาดในแต่ละบิตของการส่งข้อมูลในแต่ละสัญลักษณ์มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งใช้วิธีการถอดรหัสแบบ MAP หรือใช้อัลกอริทึมแบบ BCJR ซึ่งใช้ในการถอดรหัสแบบวนซ้ำ



รูปที่ 3.6 วงจรการถอดรหัสแบบวนซ้ำ

โดยวิธีการถอดรหัสประเภทนี้จะมีการคำนวณหาค่าอัตราส่วน A Posteriori log-likelihood ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการตัดสินใจว่าข้อมูลที่ทำการส่งมาเป็นค่าหนึ่งหรือศูนย์ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (3.10)

$$L(\hat{d}) = L(d|y) = \ln \frac{P(d_k = +1|y)}{P(d_k = -1|y)} \quad (3.10)$$

โดยที่ค่า  $L(\hat{d}_k)$  เป็นค่าอัตราส่วน A Posteriori Log-likelihood ของข้อมูลอินพุต และค่า  $P(d_k = +1|y)$  และ  $P(d_k = -1|y)$  เป็นค่าความน่าจะเป็นที่ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นบิตหนึ่งและบิตศูนย์ตามลำดับ เมื่อรับข้อมูล  $y$  โดยที่สมการ (3.10) สามารถเขียนในรูปของผลบวกของตัวแปรสามตัวดังที่แสดงในสมการที่ (3.11)

$$L(\hat{d}) = L_c \cdot y + L(d) + L_e(\hat{d}) \quad (3.11)$$

โดยค่า  $L_c \cdot y$  เป็นค่าที่ได้จากช่องสัญญาณซึ่งแสดงค่าอัตราส่วน Log-Likelihood ของความน่าจะเป็นข้าม (Cross over probability) ของ  $P$  และ  $(1-P)$  ซึ่งจะถูกเรียกว่า ค่าความน่าเชื่อถือของช่องสัญญาณ (reliability value of channel) โดยสามารถหาได้จาก  $L_c = 4 \cdot a \cdot \frac{E_s}{N_0}$  โดยที่  $a$  นั้นจะแสดงค่าการจางหายทางขนาดของช่องสัญญาณที่มีการจางหายของสัญญาณ ในกรณีช่องสัญญาณแบบ AWGN นั้นค่า  $a$  จะถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 โดยทั่วไปแล้วค่า  $L_c$  จะใช้เท่ากับ  $\frac{2}{\sigma^2}$  ซึ่งค่า  $\sigma^2$  เป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวน  $L(d)$  เป็นค่าอัตราส่วน log-likelihood ของสัญญาณ  $d_k$  โดยจะหาได้จากสมการที่ (3.12) นั้นจะถูกคำนวณใหม่ในทุกการทำงานของวงจรการถอดรหัส

$$L(\hat{d}) = \ln \frac{P(d_k = +1)}{P(d_k = -1)} \quad (3.12)$$

ค่า  $L_e(\hat{d}_k)$  คือค่า extrinsic information ซึ่งรายละเอียดในการหาแต่ละค่านั้นจะกล่าวในหัวข้อต่อไป โดยที่สามารถจัดสมการที่ (3.11) ใหม่ ให้อยู่ในรูปสมการที่ใช้สุดท้ายในการตัดสินใจว่าข้อมูลที่ส่งมาเป็นบิตหนึ่งหรือ บิตศูนย์ ได้ตามสมการที่ (3.13)

$$L^2(\hat{d}) = L_c \cdot y + L_e^1(\hat{d}) + L_e^2(\hat{d}) \quad (3.13)$$

ซึ่งค่าที่ได้จากสมการที่ (3.13) จะนำไปผ่านกระบวนการ Deinterleave และนำไปเปรียบเทียบระดับการตัดสินใจ ซึ่งในกรณีที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK นั้นค่า +1 จะใช้แทนบิตข้อมูล 1 ที่ถูกส่ง และ -1 แสดงบิตข้อมูล 0 โดยจะใช้ระดับการตัดสินใจที่ระดับศูนย์ นั่นคือถ้าค่าที่ได้มากกว่าศูนย์นั้นจะตัดสินใจว่าบิตหนึ่งถูกส่งมาแต่ถ้าค่าที่ได้น้อยกว่าศูนย์นั้นจะตัดสินใจว่าบิตข้อมูลศูนย์ถูกส่งมาตามลำดับ

### 3.3.3.2.1 การถอดรหัสด้วยวิธี MAP

การถอดรหัสด้วยวิธี MAP นั้นจะเป็นวิธีการถอดรหัสที่ให้ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่เป็นบิตน้อยที่สุด โดยจะมีการคำนวณหาค่าอัตราส่วน A Posteriori log-likelihood ของสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.10) โดยในการถอดรหัสแบบ MAP นั้นจะทำการกำหนดให้สถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้าย  $(S_1, S_N)$  อยู่ที่สถานะศูนย์ เมื่อ  $N$  คือขนาดของข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรถอดรหัสช่องสัญญาณ จากสมการที่ (3.10) นั้นสามารถทำการจัดรูปแบบของสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3.14)

$$L(\hat{d}) = L(d|y) = \ln \frac{P(d_k = +1|y)}{P(d_k = -1|y)} = \ln \frac{\sum_{d_k=+1}^{(s',s)} P(s',s,y)}{\sum_{d_k=-1}^{(s',s)} P(s',s,y)} \quad (3.14)$$

โดยที่ตัวแปร  $S'$  และ  $S$  ในสมการที่ (3.14) นั้นจะแสดงสถานะ (state) ของข้อมูลที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำของวงจรถ่ายรหัสโดยจะแสดงสถานะที่เวลา  $t-1$  และ  $t$  ตามลำดับ และ  $y$  คือข้อมูลที่รับได้จากช่องสัญญาณและเข้าสู่ภาคถอดรหัสแบบวนซ้ำซึ่งค่าที่ได้จากสมการที่ (3.14) นั้นถ้ามากกว่า 0 จะตัดสินใจว่าข้อมูลที่ส่งมาจากภาคส่งเป็นบิต 1 แต่ในทางตรงข้ามถ้าค่าที่ได้น้อยกว่า 0 จะตัดสินใจว่าข้อมูลที่ส่งมาจากภาคส่งเป็นบิต 0 โดยที่ค่าความน่าจะเป็นร่วม  $P(S',S,y)$  นั้นสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} P(S',S,y) &= P(S', y_{j<k}) \cdot P(S, y_k | S') \cdot P(y_{j>k} | S) \\ &= \underbrace{P(S', y_{j<k})}_{\alpha_{k-1}(S')} \cdot \underbrace{P(S|S') \cdot P(y_k|S',S)}_{\gamma_k(S',S)} \cdot \underbrace{P(y_{j>k}|S)}_{\beta_k(S)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่ค่า  $y_{i<k}$  แสดงถึงลำดับของสัญญาณที่รับเข้ามาที่วงจรถอดรหัสตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงที่เวลา  $k-1$  และค่า  $y_{i>k}$  จะแทนลำดับของข้อมูลที่เข้าสู่วงจรถอดรหัสตั้งแต่เวลา  $k+1$  จนถึงข้อมูลสุดท้ายที่เข้าสู่วงจรถอดรหัส โดยที่ตัวแปร  $\alpha$  และ  $\beta$  จะหาได้จาก forward recursion และ backward recursion ของกระบวนการถอดรหัสแบบ MAP ตามลำดับซึ่งวิธีในการหาค่าของตัวแปรดังกล่าวจะแสดงในสมการที่ (3.16) และสมการที่ (3.17) ตามลำดับ

$$\alpha_k(S) = \sum_{(S',S)} \alpha_{k-1}(S') \cdot \gamma_k(S',S) \quad (3.16)$$

$$\beta_{k-1}(S') = \sum_{(S',S)} \beta_k(S) \cdot \gamma_k(S',S) \quad (3.17)$$

โดยในการหาค่า  $\alpha$  นั้นจะกำหนดค่าของ  $\alpha_0(S)$  โดยที่ค่า  $S = 0, 1, \dots, M_s$  ซึ่ง  $S$  คือสถานะในหน่วยความจำของภาคเข้ารหัส โดยที่ค่า  $M_s$  เป็นค่าสถานะ (state) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการเข้ารหัสซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของหน่วยความจำของวงจรถ่ายรหัส ซึ่งจะเท่ากับ  $2^m$  เมื่อ  $m$  คือขนาดของหน่วยความจำของภาคเข้ารหัส ในการหาค่า  $\alpha$  ตอนเริ่มต้นจะทำการกำหนดค่า  $\alpha$  เริ่มต้นตามสมการที่ (3.18)

$$\alpha_0(S) = \begin{cases} 1 & S = 0 \\ 0 & S \neq 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

สำหรับการกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $\beta$  ในการหาค่า Backward recursion นั้นจะกำหนดจากเงื่อนไขตามสมการที่ (3.19)

$$\beta_N(S) = \begin{cases} 1 & S = 0 \\ 0 & S \neq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

ในกรณีที่ไม่มีทราบสถานะสุดท้ายของ Trellis นั้นจะทำการกำหนดให้ค่า  $\beta$  ที่ตำแหน่ง  $N$  มีค่าเท่ากับหนึ่งซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.20)

$$\beta_N(S) = \frac{1}{M_s} \quad (3.20)$$

การหาค่า  $\gamma$  ในสมการที่ (3.15) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อใช้ในการหาค่าของ  $\gamma$  ที่เวลา  $k$  ใดๆ ได้ตามสมการที่ (3.21) โดยที่  $y$  คือข้อมูลที่รับได้จากช่องสัญญาณและ  $x$  คือข้อมูลที่ถูกส่งจากภาคส่งก่อนเข้าสู่ช่องสัญญาณ และค่า  $P(i)$  คือค่าความน่าจะเป็นที่บิตข้อมูล 0 หรือ 1 จะถูกส่ง

$$\gamma_k^i(S', S) = p_k(i) \exp \left( - \frac{\sum_{j=0}^{n-1} (y_{k,j}^i - x_{k,j}^i(s))^2}{2\sigma^2} \right) \quad \text{for } i = 0, 1 \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.15) เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (3.14) แล้วสมการเขียนสมการที่ (3.14) ใหม่ได้ดังนี้

$$L(\hat{d}_k) = \ln \frac{\sum_{(S', S)}^{(S', S)} \gamma_k(S', S) \cdot \alpha_{k-1}(S') \cdot \beta_k(S)}{\sum_{(S', S)}^{(S', S)} \gamma_k(S', S) \cdot \alpha_{k-1}(S') \cdot \beta_k(S)} \quad (3.22)$$

จากความสัมพันธ์ในการหาค่าอัตราส่วน Log-likelihood ในสมการที่ (3.9) เมื่อนำเขาไปเทียบกับ ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.22) นั้นจะสามารถหาค่าอัตรา log-likelihood ได้ตามสมการที่ (3.23)

$$L(\hat{d}_k) = \ln \frac{p(d_k = +1)}{p(d_k = -1)} + L_c \cdot y_{k,1} + L_e(\hat{d}_k) \quad (3.23)$$

โดยที่  $L_e(\hat{d}_k)$  นั้นจะหาได้จากสมการที่ (3.24) ซึ่งค่า  $L_e(\hat{d}_k)$  จะถูกเรียกว่าค่า extrinsic information ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการหาค่า priori probability ของวงจรถอดรหัสในตัวถัดไป ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.25)

$$L_e(\hat{d}_k) = \ln \frac{\sum_{d_k=+1}^{(S',S)} \alpha_{k-1}(S') \cdot \exp \left( -\frac{\sum_{j=1}^{n-1} (y_{k,j} - x_{k,j}^1(S))^2}{2\sigma^2} \right) \cdot \beta_k(S)}{\sum_{d_k=-1}^{(S',S)} \alpha_{k-1}(S') \cdot \exp \left( -\frac{\sum_{j=0}^{n-1} (y_{k,j} - x_{k,j}^0(S))^2}{2\sigma^2} \right) \cdot \beta_k(S)} \quad (3.24)$$

$$P^2(d_k = +1) = \frac{e^{\tilde{L}_e(\hat{d}_k)}}{1 + e^{\tilde{L}_e(\hat{d}_k)}} \quad (3.25)$$

$$P^2(d_k = -1) = \frac{1}{1 + e^{\tilde{L}_e(\hat{d}_k)}}$$

โดยค่าที่แสดงในสมการที่ (3.25) นั้นจะใช้ในวงจรถอดรหัสชุดที่สอง โดยที่ตัวแปร  $\tilde{L}_e(\hat{d}_k)$  คือค่า extrinsic information ที่ผ่านกระบวนการจัดเรียงลำดับของข้อมูลใหม่ซึ่งสอดคล้องกันกับภาคเข้ารหัส สำหรับการหาค่า priori probability ในรอบต่อไป ของวงจรถอดรหัสตัวอื่นจะใช้หลักการเดียวกัน โดยที่ค่า priori probability นั้นจะถูกใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการถอดรหัสแบบวนซ้ำ

### 3.3.3.2.2 การถอดรหัสด้วยวิธี Max Log MAP

การถอดรหัสด้วยวิธีการ MAP นั้นเป็นวิธีการถอดรหัสที่มีความต้องการใช้หน่วยความจำและมีจำนวนของกระบวนการทำงานในด้านการคูณและเอกซ์โพเนนเชียล

(exponential) ที่มากทำให้วิธีการถอดรหัสประเภทนี้มีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการนำไปใช้งานในระบบการสื่อสารดังนั้น จึงได้มีการนำเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้ความซับซ้อนของกระบวนการถอดรหัสลดลง โดยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้คือ การนำเอาเทคนิคในด้าน Logarithm (log) และการใช้ฟังก์ชันหาค่าสูงสุด (MAX function) เพื่อใช้ในการประมาณค่าที่ได้จากกระบวนการถอดรหัส โดยตัวแปร  $\gamma_i^i(S', S)$   $\alpha_i(S)$  และ  $\beta_i(S)$  ถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ใหม่คือ  $\bar{\gamma}_i^i(S', S)$ ,  $\bar{\alpha}_i(S)$  และ  $\bar{\beta}_i(S)$  ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\bar{\gamma}_i^i(S', S) = \log \gamma_i^i(S', S) \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_i(S) &= \log \alpha_i(S) \\ &= \log \sum_{(S', S)} e^{\bar{\alpha}_{i-1}(S') + \bar{\gamma}_i^i(S', S)} \end{aligned} \quad (3.27)$$

โดยที่ค่าเริ่มต้นของการคำนวณหาค่า  $\bar{\alpha}_i(S)$  ในสมการที่ (3.27) จะถูกกำหนดจากสมการที่ (3.28)

$$\bar{\alpha}_0(S) = \begin{cases} 0 & S = 0 \\ -\infty & S \neq 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

เช่นเดียวกับการคำนวณค่า  $\bar{\beta}_i(S)$  จะสามารถหาค่าได้จากการนำเอาฟังก์ชัน logarithm มาใช้งานซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการที่ (3.29) และในสมการที่ (3.30) จะแสดงเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณหาค่า  $\beta$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณในสมการที่ (3.29) ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับวิธีการหาในสมการที่ (3.27)

$$\begin{aligned} \bar{\beta}_i(S) &= \log \beta_i(S) \\ &= \log \sum_{(S', S)} e^{\bar{\beta}_{i+1}(S') + \bar{\gamma}_{i+1}^i(S, S')} \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\bar{\beta}_i(S) = \begin{cases} 0 & S = 0 \\ -\infty & S \neq 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

จากสมการ (3.26) ถึง (3.30) จะสามารถหาค่าอัตราส่วน Log likelihood ได้ดังสมการที่ (3.31) ซึ่งวิธีการในการลดความซับซ้อนของวงจรถอดรหัสสามารถทำได้โดยการใช้ Max function ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณค่าของสมการโดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.32)

$$\Lambda(c_i) = \log \frac{\sum_{d_i=+1}^{(S',S)} e^{\bar{\alpha}_{i-1}(S') + \bar{\gamma}_i^i(S',S) + \bar{\beta}_i(S)}}{\sum_{d_i=-1}^{(S',S)} e^{\bar{\alpha}_{i-1}(S') + \bar{\gamma}_i^i(S',S) + \bar{\beta}_i(S)}} \quad (3.31)$$

$$\log(e^{\delta_1} + e^{\delta_2} + \dots + e^{\delta_n}) = \max_{i \in \{1,2,\dots,n\}} \delta_i \quad (3.32)$$

โดยสมการที่ (3.32) มีจุดประสงค์เพื่อการประมาณค่าต่างๆ ที่ใช้ในการถอดรหัสดังนั้น จึงสามารถหาค่า Log likelihood ratio ใหม่ได้ดังสมการที่ (3.33)

$$\Lambda(C_i) \approx \max_S [\bar{\gamma}_i^1(S',S) + \bar{\alpha}_{i-1}(S') + \bar{\beta}_i(S)] - \max_S [\bar{\gamma}_i^1(S',S) + \bar{\alpha}_{i-1}(S') + \bar{\beta}_i(S)] \quad (3.33)$$

จากการที่วิธีการถอดรหัสแบบ Max Log MAP เป็นการประมาณค่าต่างๆ และนำเอาค่าที่ได้มาใช้ในระบบการถอดรหัส ดังนั้นประสิทธิภาพในการทำงานของวงจรถอดรหัสที่มีการใช้วิธีการถอดรหัสประเภทนี้มาใช้งาน จึงมีค่าที่ต่ำกว่ากรณีของภาคถอดรหัสที่ใช้ระบบการถอดรหัสแบบ MAP

### 3.3.3.2.3 การถอดรหัสด้วยวิธี Log MAP

เนื่องจากการที่วิธีการลดความซับซ้อนในการคำนวณของภาคถอดรหัสด้วยวิธีการแบบ MAX Log MAP นั้นใช้วิธีการประมาณค่าต่างๆ ในการถอดรหัส ดังนั้นเมื่อนำเอาการถอดรหัสประเภทนี้มาใช้งานจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของภาคถอดรหัสให้มีค่าสูงขึ้น โดยนำเอาวิธีการคำนวณแบบ Jacobi มาใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณให้มีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งวิธีการคำนวณแบบ Jacobi สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.34)

$$\log(e^{\delta_1} + e^{\delta_2}) = \max(\delta_1, \delta_2) + \log(1 + e^{-|\delta_2 - \delta_1|}) \quad (3.34)$$

$$\max(\delta_1, \delta_2) + f_c(|\delta_2 - \delta_1|)$$

โดยที่  $f_c(\cdot)$  เป็นฟังก์ชันสหสัมพันธ์ซึ่งในการนำไปใช้งานจริงนั้นสามารถทำได้โดยการบันทึกเอาไว้ในหน่วยความจำ และจากการนำเอาอัลกอริทึมแบบ jacobi มาใช้งานนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพของภาคถอดรหัสแบบ Log MAP มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการถอดรหัสแบบ MAX LOG MAP และยังคงมีความซับซ้อนของกระบวนการในการถอดรหัสน้อยกว่าด้วย

### 3.3.4 รหัสแบบบล็อกเทอร์โบ

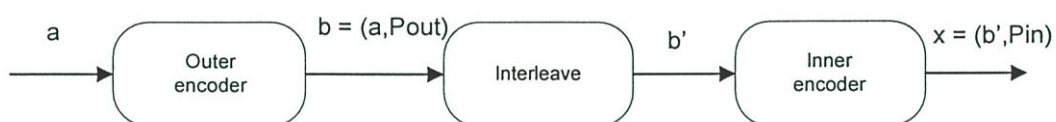
รหัสแบบบล็อกเทอร์โบนั้นได้ถูกเสนอครั้งแรกในปี 1994 โดย R. Pyndiah, A. Glavieux, A. Picart และ S.Jacq [2] โดยเป็นการนำเอาการเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบ และวิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำ มาทำงานร่วมกัน ซึ่งในบทความแรกที่นำเสนอได้ใช้วิธีการเข้ารหัสบล็อกแบบ BCH และในปี 1996 ได้มีการนำเสนอถึงประสิทธิภาพของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ เมื่อนำรหัสแบบ Reed – Solomon (RS-Code) มาใช้งาน โดยที่วิธีการถอดรหัสแบบบล็อกเทอร์โบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ วิธีการถอดรหัสแบบ Soft-Input Soft-Output (SISO) ซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของการใช้แผนภาพ trellis และวิธีการถอดรหัสที่อาศัยวิธีการทางพีชคณิต (Algebraic Decoding) โดยที่วิธีการถอดรหัสแบบนี้จะมีความซับซ้อนของภาคถอดรหัสน้อยกว่าวิธีการถอดรหัสแบบแรกโดยอาศัยวิธีการแบบ Chase II โดยวิธีการแบบ Chase II นี้จะทำการลดจำนวนกลุ่มของคำรหัสที่ใช้ในการพิจารณาในกระบวนการถอดรหัส ซึ่งกลุ่มของคำรหัสที่ใช้จะเป็นกลุ่มของคำรหัสที่มีความน่าจะเป็นของคำรหัสที่ทำการส่งในภาคส่งของระบบการสื่อสาร โดยที่กลุ่มของคำรหัสที่ใช้นั้นจะได้มาจากการนำเอาข้อมูลของช่องสัญญาณมาใช้ในการพิจารณา (Channel information) โดยรายละเอียดของส่วนต่างๆ ของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ประสิทธิภาพของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบนั้นจะดีขึ้นในทุกๆ ครั้งที่มีการวนซ้ำในขั้นตอนการถอดรหัส และได้มีการนำเอารหัสแบบบล็อกเทอร์โบมาใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายสำหรับการส่งข้อมูลแบบ Packet เช่น การสื่อสารไร้สาย การสื่อสารดาวเทียม ระบบจัดเก็บข้อมูล และระบบเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น (Wireless Local Areas Networks : WLAN) เป็นต้น

#### 3.3.4.1 ภาคเข้ารหัสของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ

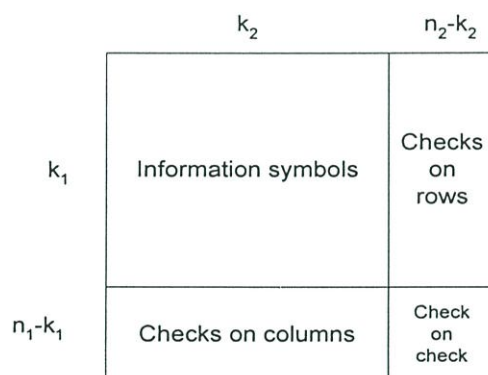
ในส่วนของภาคเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ นั้นจะอาศัยการนำเอาการเข้ารหัสแบบบล็อก 2 วงจรมาใช้งานร่วมกับวงจรสับเปลี่ยนข้อมูล โดยที่ลักษณะของการทำงานร่วมกันของวงจรการเข้ารหัสแบบบล็อกและวงจรวงสับเปลี่ยนข้อมูลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การทำงานที่มีการทำงานร่วมกันในลักษณะอนุกรม และการทำงานร่วมกันแบบขนาน

### 3.3.4.1.1 การทำงานร่วมกันแบบอนุกรมของรหัสประเภทบล็อก (Serial Concatenate Block Code)

การทำงานของภาคเข้ารหัสประเภทนี้จะนำเอารหัสบล็อก 2 วงจรมาทำการต่อกันแบบอนุกรมโดยที่จะถูกขึ้นด้วยวงจรวางสลับ ซึ่งจะเรียกรหัสบล็อกเทอร์โบที่มีการต่อในลักษณะนี้ว่า รหัสแบบผลคูณเทอร์โบ (Turbo Product Code) โดยในการเข้ารหัสนั้นข้อมูลจะถูกเข้ารหัสด้วยวงจรรหัสตัวนอก (Outer encoder) จากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการจัดเรียงข้อมูลและส่งเข้าสู่วงจรรหัสตัวใน (Inner encoder) ในรูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของการต่อวงจรรหัสแบบอนุกรม และในรูปที่ 3.8 แสดงรหัสผลคูณ (Product code)



รูปที่ 3.7 การต่อแบบอนุกรมของรหัสแบบบล็อก



รูป 3.8-รหัสผลคูณ (Product code)

โดยรหัสแบบบล็อกเทอร์โบจะมีข้อดีกว่ารหัสเทอร์โบแบบคอนโวลูชันในด้านของระยะ Hamming ต่ำสุด โดยที่รหัสแบบบล็อกเทอร์โบที่มีการทำงานที่ภาคเข้ารหัสแบบอนุกรมจะให้ค่าระยะทาง Hamming ต่ำสุดเท่ากับผลคูณของระยะทาง Hamming ของส่วนประกอบของรหัสบล็อกทั้งสอง ถ้าวางรหัสบล็อกชุดที่ 1 มีตัวแปรคือ  $(n_1, k_1, \delta_1)$  และรหัสบล็อกชุดที่ 2 มีตัวแปรเป็น  $(n_2, k_2, \delta_2)$  เมื่อ  $n$  ความยาวของคำรหัส  $k$  ขนาดของความยาวของข่าวสาร  $\delta$  แทนระยะทาง Hamming ต่ำสุดของรหัสตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยที่รหัสบล็อกแต่ละตัวจะมีค่าอัตราการเข้ารหัสเป็น  $R_1$  และ  $R_2$  ตามลำดับ ค่าของตัวแปรของคำรหัสของการเข้ารหัสประเภทนี้จะได้จากผลคูณของรหัสบล็อก  $C_1$  และ  $C_2$  ในตารางที่ 3.1 จะแสดงตัวแปรของรหัสแบบผลคูณ

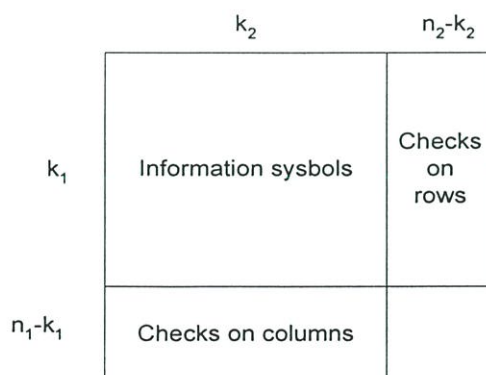
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรของรหัสผลคูณ

ตัวแปร	$C_1$	$C_2$	$C_1 \times C_2$
ความยาวคำรหัส	$n_1$	$n_2$	$n_1 \times n_2$
ความยาวของข่าวสาร	$k_1$	$k_2$	$k_1 \times k_2$
ระยะทางต่ำสุด	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_1 \times \delta_2$
อัตราการเข้ารหัส	$R_1$	$R_2$	$R_1 \times R_2$

### 3.3.4.1.2 การทำงานร่วมกันแบบขนานของรหัสประเภทบล็อก

#### (Parallel Concatenate Block Code)

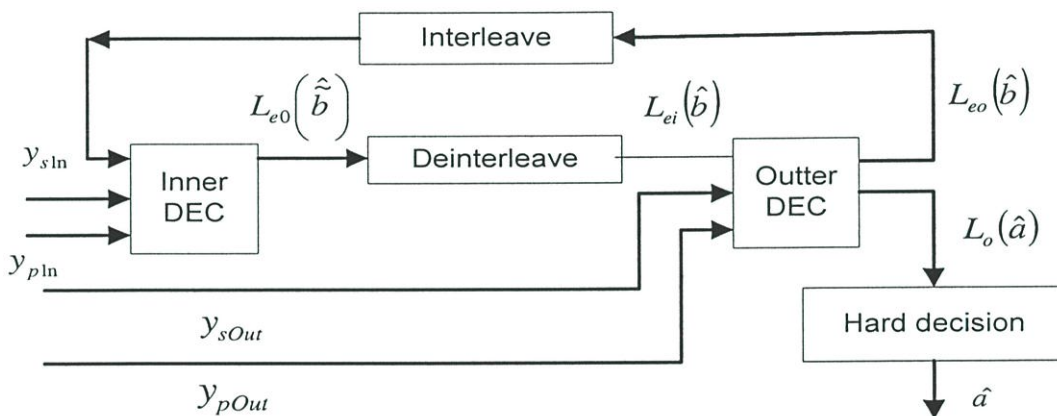
การทำงานร่วมกันของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบที่มีการนำเอารหัสแบบบล็อกตั้งแต่ 2 วงจรเข้ารหัสมาทำงานร่วมกันแบบขนานจะมีลักษณะการต่อเช่นเดียวกับรหัสแบบเทอร์โบคอนโวลูชัน ซึ่งการต่อวงจรการเข้ารหัสแบบนี้จะให้ประสิทธิภาพในด้านของระยะทาง Hamming ต่ำสุดต่ำกว่าวิธีการแรก โดยที่ระยะทาง Hamming ต่ำสุดที่ได้จากวิธีการเข้ารหัสประเภทนี้จะได้จากผลบวกของระยะทาง Hamming ต่ำสุดที่ใช้เป็นส่วนประกอบของวงจรการเข้ารหัส โดยที่คำรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบที่ได้จากการต่อในลักษณะนี้จะแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รหัสแบบบล็อกที่มีการทำงานร่วมกันแบบขนาน

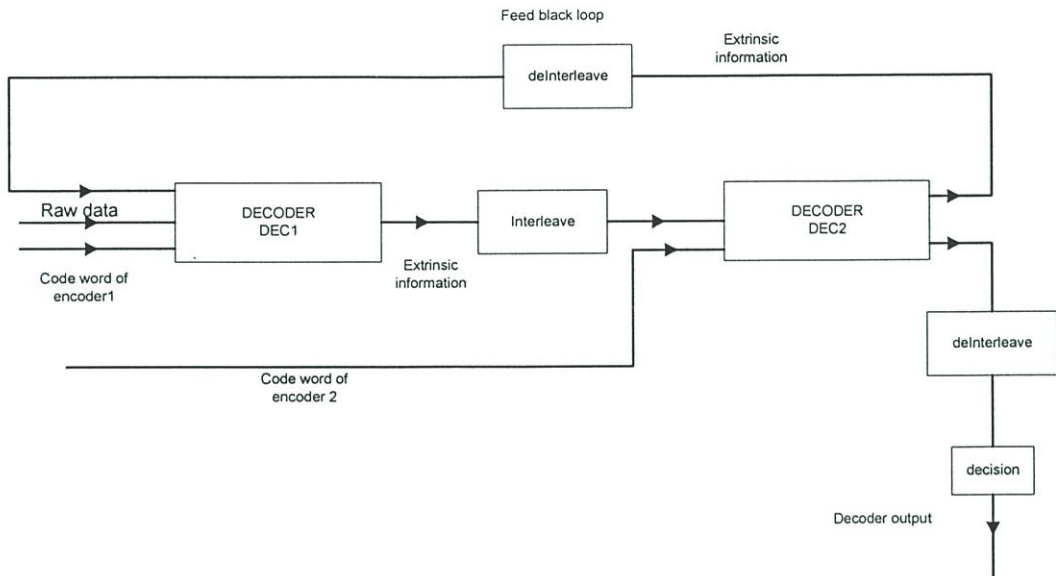
### 3.3.4.2 ภาคถอดรหัสของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ

ในส่วนของการถอดรหัสของรหัสบล็อกเทอร์โบนั้นจะอาศัยวิธีการถอดรหัสแบบวนซ้ำเช่นเดียวกับวิธีการถอดรหัสแบบเทอร์โบคอนโวลูชัน จากการศึกษาภาคเข้ารหัสของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบสามารถแสดงได้ 2 ประเภท ดังนั้นในส่วนของวงจรการถอดรหัสจึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ตามลักษณะของการต่อใช้งานของภาคเข้ารหัส โดยที่ในแต่ละวงจรถอดรหัสนั้นจะประกอบด้วยวงจรถอดรหัสแบบ Soft-Input Soft-Output 2 วงจรและวงจรการวางสลับมาทำงานร่วมกัน โดยในรูปที่ 3.10 ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมของภาคถอดรหัสแบบบล็อกเทอร์โบเมื่อภาคเข้ารหัสมีการทำงานแบบอนุกรม



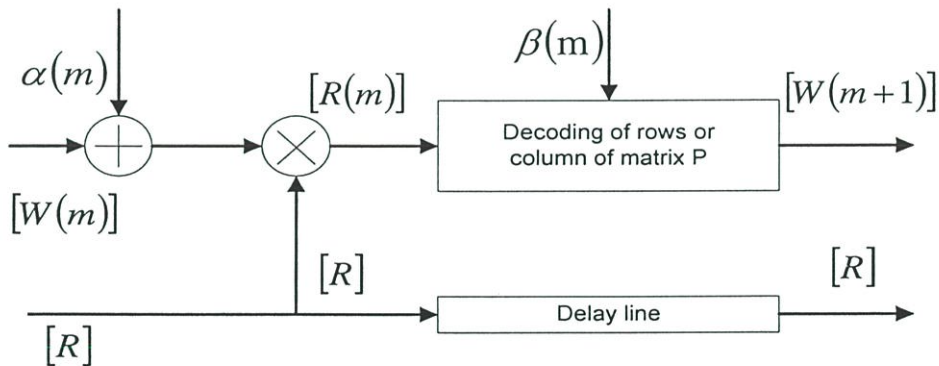
รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการถอดรหัสแบบวนซ้ำอนุกรม (Serial iterative decoding)

โดยที่วงจรตัวถอดรหัสตัวในจะรับข้อมูลจากช่องสัญญาณจากนั้นจะทำการถอดรหัสแล้วค่าของ  $L_{e0}(\hat{b})$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ส่งไปที่กระบวนการวางสลับย้อนกลับ (Deinterleave) ซึ่งจะได้ค่า  $L_{ei}(\hat{b})$  ที่เป็นค่าที่ใช้ส่งไปสู่วงจรถอดรหัสตัวนอก และที่วงจรถอดรหัสตัวนี้จะให้ข้อมูล  $L_{eo}(\hat{b})$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ส่งกลับไปในวงจรถอดรหัสตัวใน โดยที่เมื่อถึงรอบสุดท้ายของการถอดรหัสค่า Soft Output ของข้อมูลจะถูกตัดสินที่วงจรถอดรหัสตัวนอก โดยที่เครื่องหมายของค่านี้จะใช้ในการตัดสินใจว่าข้อมูลที่รับได้เป็นบิต 1 หรือ บิต 0 และในส่วนของบล็อกไดอะแกรมของวงจรถอดรหัสวนซ้ำแบบขนานจะแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งหลักการการทำงานจะเหมือนกับหลักการของวงจรการถอดรหัสวนซ้ำแบบอนุกรม และในรูปที่ 3.12 ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมของส่วนประกอบแต่ละส่วนของภาคถอดรหัส



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของวงจรการถอดรหัสแบบวนซ้ำขนาน

(Parallel iterative decoding)



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของส่วนประกอบของภาคถอดรหัสสำหรับรหัสบล็อกเทอร์โบ

โดยที่ค่า  $[R]$  เป็นค่าของข้อมูลที่ได้รับได้จากช่องสัญญาณ  $[W(m)]$  เป็นค่า extrinsic information ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของภาคถอดรหัสให้ดีขึ้นในทุกครั้งที่มีการวนรอบการถอดรหัส  $\alpha(m)$  เป็นตัวแปรน้ำหนัก (Scaling factor) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ลดอิทธิพลของค่า extrinsic information ที่ไม่น่าเชื่อถือในการถอดรหัสแบบวนซ้ำในรอบแรก และค่า  $\beta(m)$  เป็นค่าความน่าเชื่อถือในการตัดสินใจข้อมูลในแต่ละบิตของคำรหัส โดยที่ค่าของ Soft Input ที่เข้าสู่วงจรถอดรหัสแต่ละตัวจะสามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.35)

$$[R'(2)] = [R] + \alpha(2)[W(2)] \quad (3.35)$$

ค่าของ  $\alpha(m)$  นั้นจะมีค่ามากขึ้นในทุกๆ ครั้งที่ทำการถอดรหัส โดยที่ค่าของตัวแปรน้ำหนักจะมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละรอบของการถอดรหัส ในสมการที่ (3.36) แสดงตัวอย่างของค่าตัวแปรน้ำหนัก

$$\alpha(t) = [0.0, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.0] \quad (3.36)$$

ค่าของตัวแปร extrinsic information นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (3.37) ซึ่งเป็นค่าผลต่างของค่าข้อมูลแบบ Soft input และค่าของข้อมูล Soft output ที่ได้จากวงจรการถอดรหัสแต่ละตัว

$$W[ ] = R_{output}^1 - R_{input}^1 \quad (3.37)$$

โดยที่ค่าของ Soft input นั้นจะเป็นค่าของสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณ และในส่วนของค่า Soft output นั้นจะหาได้จากการหาค่าความน่าเชื่อถือของคำรหัสที่ได้จากวงจรการถอดรหัสแต่ละตัว โดยที่วิธีการในการถอดรหัสนั้นจะใช้วิธีการแบบ Chase 2 ซึ่งรายละเอียดของวิธีการถอดรหัสวิธีการนี้จะอธิบายในภาคผนวกต่อไป โดยกำหนดให้ค่าของคำรหัสที่ได้จากภาคถอดรหัสคือ D และในการหาค่าความน่าเชื่อถือของคำรหัสที่ได้นี้ จะต้องทำการหาคำรหัสอีกตัวมาทำการเปรียบเทียบโดยที่กำหนดให้เป็นตัวแปร B ซึ่งสมาชิกของคำรหัสของ B ต้องแตกต่างจากสมาชิกของคำรหัส D ซึ่งจะสามารถหาค่า Soft output ที่ตำแหน่งใดได้ดังสมการที่ (3.38) ซึ่งสมการนี้จะใช้ในกรณีที่สามารถหาคำรหัส B ได้

$$r'_j = \left( \frac{|R-B|^2 - |R-D|^2}{4} \right) d_j \quad (3.38)$$

ในบางกรณีที่ไม่สามารถหาคำรหัส B นั้นสามารถหาค่า Soft output ของวงจรถอดรหัสได้จากสมการที่ (3.39)

$$r'_j = \beta \times d_j \text{ with } \beta \geq 0 \quad (3.39)$$

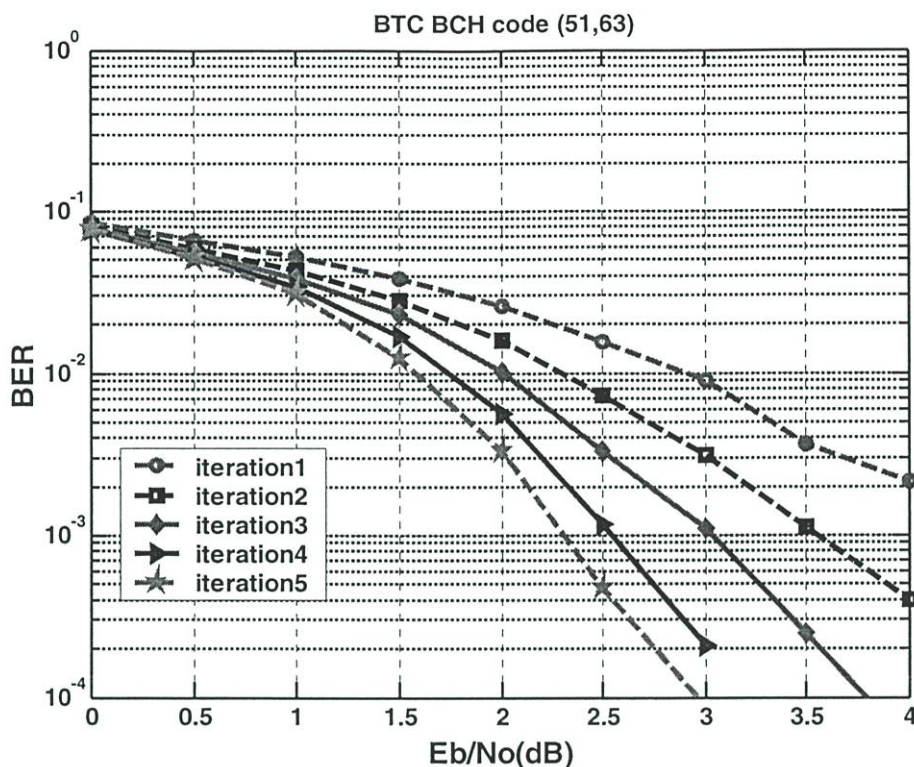
โดยที่ค่า  $\beta$  คือค่าความน่าเชื่อถือของบิตข้อมูล D ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าคาร์รหัส B ได้ ซึ่งจะสามารถหาค่า  $\beta$  ได้จากสมการที่ (3.40)

$$\beta \approx \left| \ln \left( \frac{\Pr \{d_j = x_j\}}{\Pr \{d_j \neq x_j\}} \right) \right| \quad (3.40)$$

โดยที่ตัวแปร  $\beta$  เป็นฟังก์ชันของอัตราความผิดพลาดบิต หรือจำนวนของการถอดรหัสซึ่งในสมการที่ (3.41) เป็นตัวอย่างของค่าตัวแปร  $\beta$  ที่ใช้ใน [14]

$$\beta(t) = [0.2 \quad 0.4 \quad 0.6 \quad 0.8 \quad 1.0 \quad 1.0 \quad 1.0 \quad 1.0] \quad (3.41)$$

โดยในการถอดรหัสแบบบล็อกเทอร์โบนั้นถ้าคาร์รหัส B ไม่มีแล้วค่าของความน่าเชื่อถือของบิต D ที่ได้จากวงจรการถอดรหัสแบบ Chase 2 จะไม่สำคัญเพราะว่าเป็นไปได้ที่คาร์รหัส B นั้นมีความแตกต่างจากสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ยของค่าความน่าเชื่อถือ  $\beta$  จึงเพียงพอที่จะใช้ในการถอดรหัส โดยที่ในรูปที่ 3.13 ได้แสดงถึงประสิทธิภาพของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบซึ่งนำเอารหัสแบบ BCH ที่มีขนาดเท่ากับ (51,63) มาทำการส่งผ่านช่องสัญญาณแบบ AWGN ซึ่งจะพบว่าทุกครั้งที่มีการถอดรหัสแบบวนซ้ำเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น



รูปที่ 3.13 ประสิทธิภาพของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ (BCH(51,63)) เมื่อทำการส่งผ่านช่องสัญญาณแบบ AWGN

### 3.4 สรุป

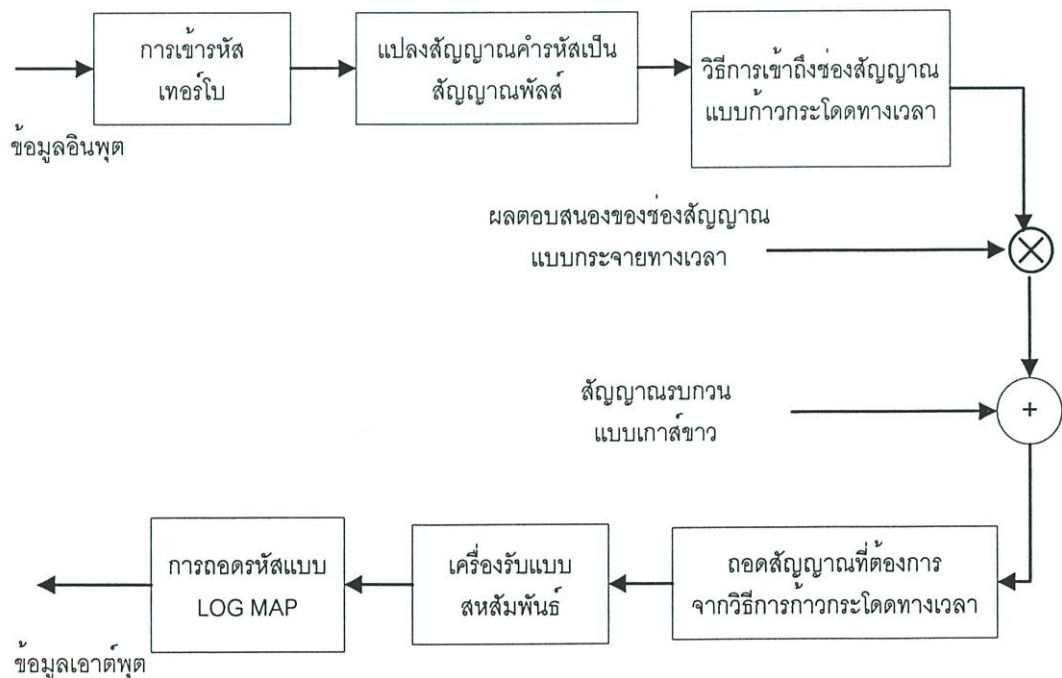
รหัสแก้ไขความผิดพลาดนั้นเป็นการเข้ารหัสข่าวสารให้มีความสามารถในการตรวจจับและแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้ในภาครับของระบบการสื่อสาร ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมบรูณ์ของช่องสัญญาณเช่น สัญญาณรบกวน การจางหายของสัญญาณอันเนื่องมาจากมีเส้นทางในการเดินทางจากภาคส่งไปภาครับมากกว่าหนึ่งเส้นทาง โดยที่หลักการของการเข้ารหัสประเภทนี้จะทำการเพิ่มข้อมูลเข้าไปในข่าวสารที่ต้องการส่งผ่านสู่ช่องสัญญาณ ซึ่งข้อมูลนี้จะใช้ในการตรวจจับและแก้ไขข้อมูล รหัสแก้ไขความผิดพลาดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ รหัสแบบบล็อก และรหัสแบบคอนโวลูชัน และในปี 1993 ได้มีการพัฒนารหัสเทอร์โบขึ้นซึ่งมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงขอบเขตของ Shannon โดยที่รหัสแบบเทอร์โบในตอนแรกนั้นเรียกว่าเทอร์โบคอนโวลูชัน และได้มีการดัดแปลงรหัสแบบเทอร์โบให้มีความซับซ้อนน้อยลง ซึ่งจะเรียกว่ารหัสบล็อกเทอร์โบ ซึ่งในภาคเข้ารหัสจะใช้รหัสแบบบล็อกแทนรหัสแบบคอนโวลูชัน เพื่อลดความซับซ้อนของรหัสแก้ไขความผิดพลาด และได้มีการประยุกต์ใช้รหัสเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบในงานต่างๆ เช่น การสื่อสารดาวเทียม ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ระบบเครือข่ายไร้สาย และระบบบันทึกข้อมูล เป็นต้น

## บทที่ 4

# การประยุกต์ใช้รหัสแบบเทอร์โบสำหรับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

### 4.1 บทนำ

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงการนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อใช้วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบก้าวกระโดดทางเวลา โดยพิจารณาเมื่อนำเอาสัญญาณข้อมูลทำการส่งผ่านช่องสัญญาณแบบการกระจายทางเวลา (Time dispersion channel) ซึ่งผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่นำมาใช้นั้นได้จากผลการทดลอง ซึ่งจะแสดงวิธีการในการทดลองในภาคผนวก ค โดยที่สามารถแบ่งระบบที่ทำการศึกษาได้เป็น 3 ส่วน คือ ภาคส่ง ช่องสัญญาณ และภาครับของระบบการสื่อสาร ซึ่งสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบเทอร์โบมาใช้งาน



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ทำการศึกษา

## 4.2 แบบจำลองเครื่องส่ง

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างที่ใช้วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบก้าวกระโดดทางเวลาที่นำมาใช้ในการจำลองครั้งนี้นั้น สมมติให้มีจำนวนผู้ใช้งานเท่ากับ  $K$  ราย และกำหนดให้ข้อมูลบิตรหัสที่ใช้ในการกำหนดลำดับของการส่งสัญญาณข้อมูลในเฟรมเวลาเป็นรหัสฐานสอง โดยที่หลักการของระบบ CDMA ประเภทนี้จะใช้สัญญาณรหัส (Code signals) ในการกำหนดลำดับของการส่งข้อมูลของผู้ใช้แต่ละราย ซึ่งลำดับของการส่งของผู้ใช้นั้นจะแตกต่างกันในแต่ละเฟรมเวลา โดยที่สัญญาณที่ส่งเมื่อมีผู้ใช้เท่ากับ  $K$  คือ

$$S_{ir}^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} D_{(j/N_s)}^{(k)} \cdot w_{ir}(t - jT_f - c_j^{(k)}T_c) \quad (4.1)$$

ในสมการที่ (4.1) ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัญญาณข้อมูลที่ทำการส่งมาโดยที่

- $w_{ir}$  คือ สัญญาณที่ใช้ในการส่ง (Transmission signal)
- $T_f$  คือ คาบของเฟรมเวลา (Frame duration)
- $T_c$  คือ คาบของสัญญาณชิป (Chip duration)
- $c_j^{(k)}$  คือ รหัสที่ใช้ในการกำหนดลำดับของการส่งสัญญาณ
- $D_{(j/N_s)}^{(k)}$  คือ สัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง
- $N_s$  คือ จำนวนของสัญญาณพัลส์ที่ใช้แทนสัญญาณข้อมูล 1 บิต
- $j$  คือ หมายเลขเฟรมเวลาที่ทำการส่ง

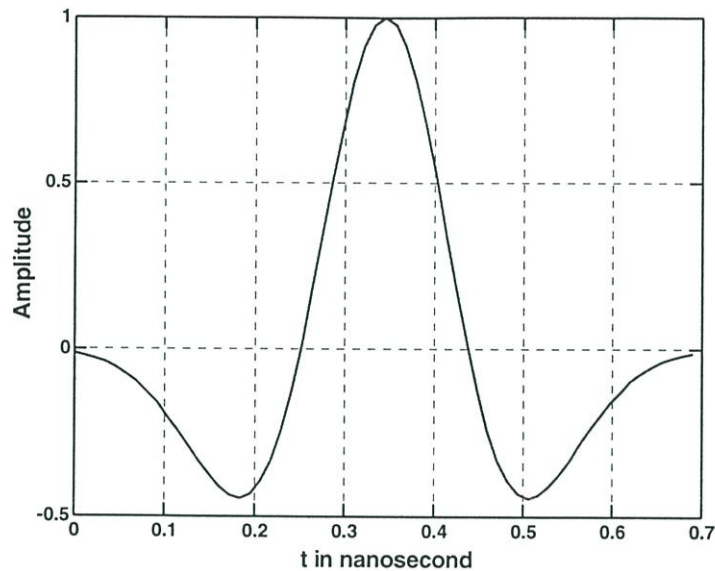
จากสมการที่ (4.1) ค่าของ  $w_{ir}(t - jT_f)$  คือสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการส่งของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้าง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$w_{ir}(t) = \left[ 1 - 4\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] \exp \left[ -2\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

โดยที่  $\tau_m$  คือ ค่าพัลส์พารามิเตอร์

ซึ่งรูปร่างของสัญญาณที่ทำการส่งในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างนี้จะแสดงในรูปที่ 4.2 และจากสมการที่ (4.1) ค่าของรหัสนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$c^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j^{(k)} Pa(t - jT_c) \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.2 สัญญาณแบบเกาส์เซียนดับเล็ท ที่ใช้ในการส่งในระบบการสื่อสารสำหรับระบบ UWB

$$(\tau_m = 0.2887 \text{ nsec})$$

โดยที่  $c^{(k)}(t)$  คือ รหัสการกระโดดทางเวลา (Time hopping code) ที่มีค่าแอมพลิจูดเป็น 1 และ  $-1$  และ  $Pa(t)$  คือสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมซึ่งสูง 1 หน่วย และมีความกว้างเท่ากับ  $T_c$  โดยที่รหัสการกระโดดทางเวลานั้นจะมีคาบของรหัสเท่ากับ  $N_p$  ซึ่งหมายความว่า  $c_{j+iN_p}^{(k)} = c_j^{(k)}$  สำหรับทุกค่าของ  $i$  และ  $j$  โดยที่แต่ละรหัสนี้จะมีความยาวอยู่ในช่วง

$$0 \leq c_j^{(k)} < N_h \quad (4.4)$$

ซึ่งรหัสก้าวกระโดดทางเวลานี้จะเป็นตัวประวิงเวลาของการส่งในแต่ละสัญญาณพัลส์ออกไปในแต่ละขบวนพัลส์ (Pulse train) โดยที่สัญญาณพัลส์ที่เฟรมเวลา  $j$  จะถูกประวิงเวลาไป  $c_j^{(k)}T_c$  วินาที เพราะฉะนั้นการประวิงเวลาที่เกิดจากรหัสก้าวกระโดดทางเวลานั้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง  $N_hT_c$  วินาที ซึ่งเราจะกำหนดให้ค่าของ  $N_hT_c$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับคาบเฟรมเวลา ( $T_f$ ) ดังนั้นอัตราส่วน  $N_hT_c/T_f$  นั้นจะแสดงถึงช่วงเวลาของเฟรมเวลาที่อนุญาตให้ส่งข้อมูลในของผู้ใช้แต่ละราย โดยที่จะกำหนดให้อัตราส่วน  $N_hT_c/T_f$  มีค่าน้อยกว่า 1 ถ้าค่าของ  $N_hT_c$  มีค่าน้อยแล้วความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้แต่ละรายมีโอกาสส่งข้อมูลชนกันมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นได้

มากแต่ทว่าในทางตรงข้ามถ้า  $N_h T_c / T_f$  มีค่ามากกว่า 1 แล้วจะสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการออกแบบรหัสที่ดี แล้วจะส่งผลทำให้ในหลายๆ กรณีแล้วผลการแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ (Multiple access interference) แต่ละรายจะมีการแจกแจงแบบเกาส์ ค่า  $D_{[j/N_s]}^{(k)}$  เป็นค่าสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแบบไบเฟส และมีค่าแอมพลิจูดที่เป็นไปได้ 2 ค่าคือ 1 และ -1 เพื่อใช้แทนสัญญาณข้อมูลบิต 1 และ 0 ตามลำดับ จากการที่ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะใช้การมอดูเลตแบบ Oversampled ซึ่งจะใช้สัญญาณพัลส์  $N_s$  สัญญาณในแทนสัญญาณข้อมูล 1 บิต ซึ่งผลของการใช้วิธีการมอดูเลตประเภทนี้จะทำให้คาบของสัญญาณหนึ่งบิต ( $T_s$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $N_s T_f$  ดังนั้นสามารถหาอัตราการส่งข้อมูล (Bit rate,  $R_b$ ) ได้จากสมการ

$$R_b = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{N_s T_f} \quad bps \quad (4.5)$$

### 4.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ในการส่งของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนี้ จะมีความแตกต่างจากวิธีการส่งสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบแคบ ซึ่งใช้สัญญาณพาหะที่มีความต่อเนื่องในการส่งสัญญาณ แต่ทว่าระบบการสื่อสารประเภทนี้จะใช้สัญญาณพัลส์ในการส่งข้อมูล ดังนั้นรูปแบบของแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบการสื่อสารประเภทนี้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงได้ใช้ช่องสัญญาณที่ได้จากการทดลองมาใช้ในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร ซึ่งสัญญาณเมื่อทำการส่งผ่านช่องสัญญาณแล้วจะได้รับอิทธิพลของการแพร่กระจายของคลื่นทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่รับได้

คุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองสามารถแสดงได้ในรูปของผลตอบสนองเชิงซ้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-variant complex impulse response:  $h(t, \tau)$ ) โดยที่  $t$  และ  $\tau$  แทนเวลาที่ทำกรวัดและเวลาที่หน่วงตามลำดับ

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) \delta[t - \tau_l(t)] \quad (4.6)$$

โดยที่  $\alpha_l(t)$  คือ ค่าการลดทอนในแต่ละเส้นทาง

$\tau_l(t)$  คือ ค่าของการประวิงเวลาในแต่ละเส้นทาง

$L$  คือ จำนวนเส้นทางทั้งหมดระหว่างภาคส่ง และ ภาครับของระบบการสื่อสาร

#### 4.4 แบบจำลองเครื่องรับ

สัญญาณพัลส์ที่รับได้ที่ภาครับของระบบการสื่อสารจะได้รับอิทธิพลของปรากฏการณ์การแพร่กระจายของคลื่นและสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสารทำให้รูปร่างของสัญญาณที่ส่งเกิดการผิดเพี้ยน โดยที่สัญญาณพัลส์ที่รับได้สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} s^{(k)}(t - \tau_k) \otimes h(t, \tau_k) + n(t) \quad (4.7)$$

โดยที่  $r(t)$  คือ สัญญาณที่รับได้

$h(t, \tau)$  คือ ผลตอบสนองของช่องสัญญาณแบบมีการกระจายทางเวลา

$n(t)$  คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาว

$N_u$  คือ จำนวนผู้ใช้ทั้งหมดที่ทำการส่งในระบบการสื่อสาร

ในกรณีที่กำหนดให้สัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณที่ส่งจากผู้ใช้รายที่ 1 แล้วสัญญาณรับที่ต้องการนั้นสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (4.8)

$$r(t) = \sum_{l=1}^L s^{(1)}(t - \tau_l) \cdot \alpha_l(t - \tau_l) + n(t) \quad (4.8)$$

โดยที่  $\alpha_l(t - \tau_k)$  คือ ค่าการลดทอนของสัญญาณ (Attenuation) ในแต่ละเส้นทางของผู้ส่งรายที่ 1

เมื่อกำหนดให้ระบบการสื่อสารนี้มีความสามารถในการซิงโครไนซ์ระหว่างภาคส่งและภาครับอย่างสมบูรณ์แล้ว (Perfect synchronized) จะได้ข้อสมมุติฐานทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบคือ

$$H_d : \quad r(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \cdot w_{bit}(t) \cdot d + n(t) \quad (4.9)$$

เมื่อค่าของ  $d$  คือ -1 หรือ +1 และรูปร่างของสัญญาณข้อมูลจะกำหนดได้ตามสมการ

$$w_{bit}(t) = \sum_{j=iN_s}^{(i+1)N_s-1} w(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - \tau_1) \quad (4.10)$$

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ (Correlation receiver) ซึ่งจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณต้นแบบ และทำการหาค่าสหสัมพันธ์เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าข้อมูลที่รับได้นี้จะเป็นบิต "1" หรือ "0" ซึ่งถ้าสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณต้นแบบที่ใช้ในการเปรียบเทียบคล้ายกันมากเท่าไร ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้รูปคลื่นของสัญญาณบิต "1" เป็นสัญญาณต้นแบบซึ่งสามารถแสดงสัญญาณต้นแบบได้ตามสมการ

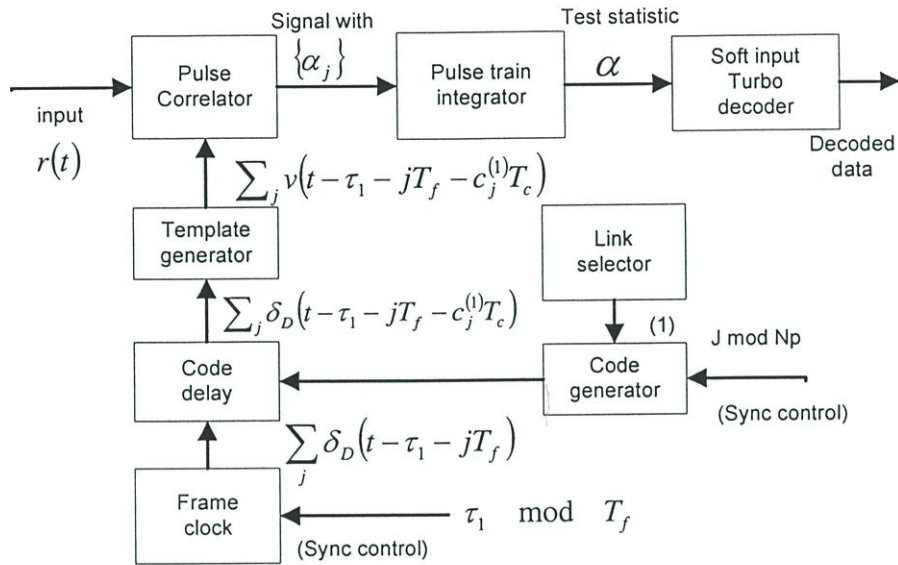
$$v_{bit}(t) \begin{cases} = w_{bit}(t) \\ = \sum_{j=iN_s}^{(i+1)N_s-1} v(t - jT_f - c_j^{(1)}T_c - \tau_1) \end{cases} \quad (4.11)$$

โดยที่  $v_{bit}(t)$  คือสัญญาณต้นแบบที่ใช้ในเครื่องรับแบบสหสัมพันธ์

สอดคล้องกับหลักการของวงจรการตัดสินใจที่เหมาะสมที่สุด (Optimal decision rule) แล้วเครื่องรับจะตัดสินใจว่าข้อมูลที่รับได้เป็นสัญญาณบิต "1" ถ้าผลรวมของค่าสหสัมพันธ์ทั้ง  $N_s$  ค่าสอดคล้องกับเงื่อนไขดังสมการ (4.12) และในรูปที่ 4.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของภาครับของระบบการสื่อสารนี้

$$U = D_0^{(1)} \Leftrightarrow \alpha \underbrace{\sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau_1 + jT_f}^{\tau_1 + (j+1)T_f} r(t)v_{bit}(t)dt}_{\text{The sum of Pulse correlation output} = \alpha} < 0 \quad (4.12)$$

*Pulse correlation output =  $\alpha_j$*



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมของภาครับสัญญาณ

ในส่วนขอระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ไม่ได้นำเอาการเข้ารหัสของสัญญาณมาใช้งานนั้นจะนำเอาค่าจากสมการที่ (4.12) มาใช้โดยตรง ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากการนำเอาค่าที่ได้จากผลรวมของค่าสหสัมพันธ์พัลส์มาทำการเปรียบเทียบกับค่า "0" ซึ่งค่าที่ออกจากวงจรเปรียบเทียบกับจะเป็นค่าข้อมูลที่มีมอดูเลตสัญญาณได้ที่ภาครับ ซึ่งจะได้อ่า "0" ถ้าผลรวมของค่าสหสัมพันธ์มีค่าน้อยกว่า 0 และมีค่าเป็น "1" ถ้าค่าสหสัมพันธ์พัลส์มีค่ามากกว่า 0 ในกรณีที่ใช้วิธีการมอดูเลตแบบไบเฟส แต่ในกรณีที่น่าเอาการเข้ารหัสของสัญญาณแบบเทอร์โบมาใช้งานนั้นค่าที่ได้จากสมการที่ (4.12) จะไม่ต้องไปผ่านกระบวนการเปรียบเทียบกับค่า 0 ก่อนแต่จะนำเอาค่าที่ได้ส่งไปสู่กระบวนการถอดรหัสโดยตรงเพื่อใช้ในกระบวนการถอดรหัสแบบละเอียด (soft decoding) ต่อไป

#### 4.5 การหาค่าประสิทธิภาพในด้านอัตราค่าผิดพลาดบิต (BER)

ในการหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตในระบบการสื่อสารนี้ จะกำหนดให้  $w_{rec}(t)$  คือสัญญาณที่รับได้ในระบบการสื่อสาร และกำหนดให้ช่วงเวลาในการรับสัญญาณคือ  $T_w$  โดยที่พลังงานของสัญญาณและฟังก์ชันสหสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสัญญาณ  $w_{rec}(t)$  นั้นสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_w = \int_{-\infty}^{\infty} [w_{rec}(t)]^2 dt \quad (4.13)$$

$$\gamma_w(\tau) \equiv \frac{1}{E_w} \int_{-\infty}^{\infty} w_{rec}(t)w_{rec}(t-\tau)dt > -1 \quad (4.14)$$

โดยที่  $E_w$  คือ ค่าพลังงานของสัญญาณ  
 $\gamma_w(\tau)$  คือ ค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation function) ที่เวลา  $\tau$

ในการที่จะหาค่าอัตราความผิดพลาดของสัญญาณนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงค่าพลังงานเฉลี่ยของสัญญาณต่อบิต (Average signal energy per bits) ก่อนซึ่งค่านี้สามารถหาได้จาก

$$E_{bit} = \alpha^2 \int_{-\infty}^{\infty} [w_{rec}]^2 dt \quad (4.15)$$

โดยในกรณีนี้จะทำการหาค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งในช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นขอบเขตบนสำหรับอัตราความผิดพลาดของข้อมูลเมื่อทำการส่งไปในระบบการสื่อสารที่มีสัญญาณรบกวน โดยที่ไม่ได้พิจารณาถึงผลการรบกวนของผู้ใช้รายอื่นในระบบการสื่อสาร

$$N = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} n(t)w_{rec}(t)dt \quad (4.16)$$

โดยที่  $N$  นั้นจะเป็นตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนของตัวแปรนี้สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma^2 = E[N^2] = \frac{1}{2} N_0 E_{bit} \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.12) นั้นสามารถกำหนดเงื่อนไขของการตัดสินใจที่ภาครับได้ว่าสัญญาณที่รับได้นั้นจะเป็นข้อมูลบิตใด โดยที่เงื่อนไขในการตัดสินใจนี้จะกำหนดตามสมการ

$$D_n = \begin{cases} +1 & \text{if } U \geq 0 \\ -1 & \text{if } U < 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

โดยที่  $U$  คือค่าที่ได้จากสมการที่ (4.12) ซึ่งเป็นค่าเอาต์พุตของเครื่องรับสหสัมพันธ์

ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ของ  $U$  นี้สามารถแสดงได้ตามสมการ

$$P(U) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0 E_{bit}}} \exp^{-\frac{(U - E_{bit})^2}{N_0 E_{bit}}} \quad (4.19)$$

จากข้อกำหนดในการตัดสินใจข้อมูลที่รับได้จากช่องสัญญาณตามสมการ (4.18) นั้นจะมีโอกาสที่จะเกิดการตัดสินใจผิดพลาดได้ 2 กรณีคือ ถ้าสัญญาณที่ส่งมาจากภาคส่งเป็นบิต 1 แต่ที่ภาครับตัดสินใจว่าข้อมูลที่รับได้เป็นบิต 0 ( $P[e | S_1]$ ) และกรณีที่ข้อมูลที่ส่งออกมาคือบิต 0 แต่ทว่าที่ภาครับตัดสินใจว่าข้อมูลที่รับได้เป็นบิต 1 ( $P[e | S_2]$ ) เมื่อ  $S_1, S_2$  คือสัญญาณที่ใช้แทนข้อมูลบิต 1 และบิต 0 ตามลำดับ

$$P(e | S_1) = P(U < 0) = \int_{-\infty}^0 P(U) dU \quad (4.20)$$

เมื่อนำเอาสมการที่ (4.20) มาทำการจัดรูปและแสดงด้วยฟังก์ชันของค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังของสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (SNR)  $\gamma_b = \frac{E_b}{N_0}$  แล้วจะได้ตามสมการข้างล่าง

$$P_e(\gamma_b) = Q(\sqrt{2\gamma_b}) \quad (4.21)$$

โดยที่ค่าฟังก์ชัน  $Q$  จะถูกนิยามตามสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งค่าของความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดตามสมการที่ (4.21) เป็นค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบไบนารีที่นิยมนำมาใช้

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty \exp^{-t^2/2} dt \quad (4.22)$$

ในกรณีนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งแล้วจะสามารถหาค่าขอบเขตบนของความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดของระบบการสื่อสารนี้เมื่อใช้วิธีการมอดูเลตแบบไบนารี [1]

$$P_b(e) \leq \sum_{d=d_f}^{\infty} W(d) \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{dR \frac{E_b}{N_0}} \right] \quad (4.23)$$

โดยที่  $W(d)$  คือ น้ำหนักทั้งหมดของ Hamming ของข้อมูลอินพุต

(Total Hamming weight of input sequence)

$P_b(e)$  คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาด

$d$  คือ ระยะ Hamming (Hamming distance)

$R$  คือ อัตราการเข้ารหัส

$\frac{E_b}{N_0}$  คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณหนึ่งบิตต่อความหนาแน่นของกำลังสัญญาณรบกวน

#### 4.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงขั้นตอนการทำงานของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง ทั้งเครื่องส่ง ช่องสัญญาณของระบบการสื่อสาร และเครื่องรับของระบบ โดยที่ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงานของระบบการสื่อสาร โดยที่การจำลองจะเริ่มจากการสร้างสัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอล การเข้ารหัสช่องสัญญาณ และนำข้อมูลที่ได้จากภาคเข้ารหัสส่งไปสู่เครื่องส่งของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง การดีเทกต์สัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณ ซึ่งเครื่องรับที่ใช้ในระบบการสื่อสารในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ และการถอดรหัสช่องสัญญาณตามลำดับ

## บทที่ 5

### ผลการจำลอง

#### 5.1 บทนำ

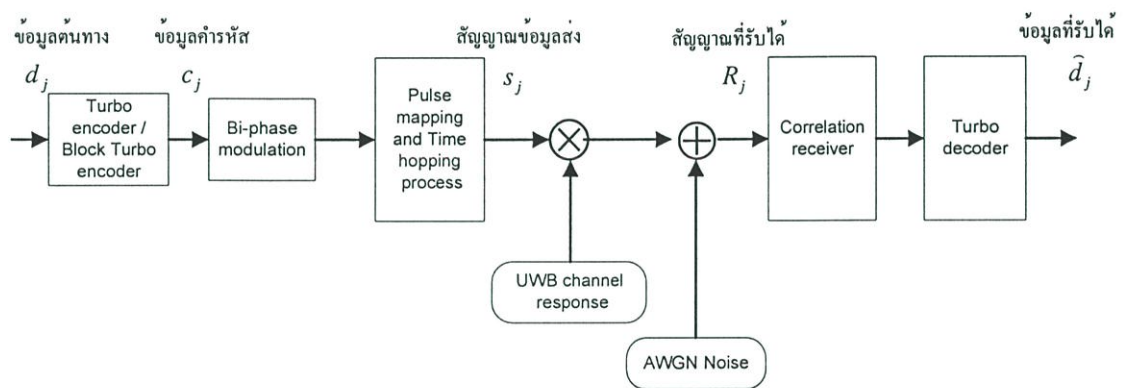
หลังจากที่ได้กล่าวถึงการออกแบบระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งตามที่ได้อธิบายแล้วในบทที่ผ่านมาเรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จะนำเสนอถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานร่วมกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งในช่องสัญญาณประเภทต่างๆ โดยที่ช่องสัญญาณที่จะใช้ในการเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะประกอบด้วยกัน 3 ประเภทคือ ช่องสัญญาณที่ไม่มีผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม (Chamber room) ช่องสัญญาณแบบเห็นเส้นสายตา (Line-of-sight channel) และช่องสัญญาณแบบไม่เห็นเส้นสายตา (Nonline-of-sight channel) ตามลำดับ โดยที่เนื้อหาในบทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนด้วยกัน และตัวแปรที่ใช้ในการแสดงประสิทธิภาพของระบบคือ ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล

- 1) การเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของการเข้ารหัสแบบเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบภายใต้ช่องสัญญาณที่ไม่มีผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม
- 2) การแสดงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อใช้จำนวนพัลส์ที่ใช้ในการแทนสัญญาณข้อมูลแตกต่างกัน
- 3) การแสดงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารประเภทนี้เมื่อนำไปใช้ในช่องสัญญาณแบบเห็นเส้นสายตา
- 4) การแสดงประสิทธิภาพของระบบสื่อสารเมื่อนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่เห็นเส้นสายตา
- 5) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเมื่อนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่เห็นเส้นสายตาและไม่เห็นเส้นสายตา

#### 5.2 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบ

รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบเทอร์โบนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ รหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบเทอร์โบคอนโวลูชัน หรือที่เรียกกันทั่วไปว่ารหัสแบบเทอร์โบ และรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างรหัสแบบเทอร์โบทั้ง 2 นั้นจะอยู่ที่ภาคเข้ารหัสเป็นส่วนใหญ่ กล่าวคือรหัสแบบเทอร์โบนี้ ที่ภาคเข้ารหัสจะใช้รหัสแบบคอนโวลูชัน 2 วงจรเข้ารหัสมาทำการต่อ

ร่วมกันแบบขนาน แต่ทว่ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบนั้นจะใช้รหัสแบบบล็อก 2 วงจรมาทำงานร่วมกันในลักษณะการต่อแบบขนานเช่นเดียวกันกับรหัสแบบเทอร์โบ โดยที่รหัสแบบบล็อกที่เลือกมาใช้งานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นรหัสแบบ BCH และใช้วิธีการถอดรหัสแบบ Chase 2 โดยที่วิธีการที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณที่ใช้ในการส่งและการรับแบบไบเฟส และทำการส่งผ่านช่องสัญญาณในสภาวะที่ไม่มีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม ที่มีระยะทางในการส่งและการรับสัญญาณนั้นมีค่าเท่ากับ 1 เมตร และใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ โดยที่บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยั้่งนั้นแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงแบบจำลองของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยั้่งที่มีการมอดูเลตแบบไบเฟสเมื่อนำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาใช้

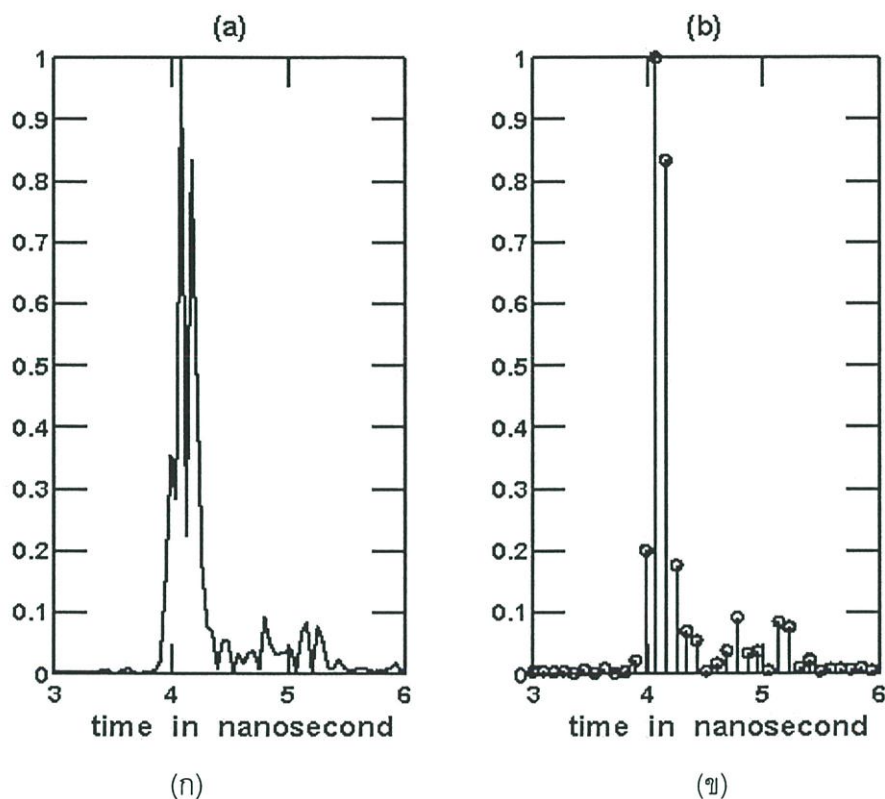
โดยที่ระบบการสื่อสารนี้จะนำเอาข้อมูลที่ต้องการส่ง  $d_j$  ไปทำการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบเทอร์โบหรือบล็อกเทอร์โบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากภาคเข้ารหัสช่องสัญญาณจะเป็นข้อมูลคำรหัส  $c_j$  จากนั้นจะนำคำรหัสที่ได้มาผ่านกระบวนการมอดูเลตแบบไบเฟสด้วยสัญญาณพัลส์แบบเกาส์ และทำการส่งผ่านสู่ระบบก้าวกระโดดทางเวลาเป็นข้อมูลสัญญาณส่ง  $s_j$  เพื่อส่งผ่านเข้าสู่ช่องสัญญาณแบบแถบความถี่กว้างยั้่งที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและมีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN สำหรับในภาครับของระบบการสื่อสารจะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์แล้วจึงนำเอาค่าที่ได้ส่งเข้าสู่ภาคถอดรหัสของรหัสเทอร์โบหรือบล็อกเทอร์โบตามลำดับ เพื่อคำนวณหาข้อมูลที่แสดงถึงข้อมูลดิจิทัล  $\hat{d}_j$  เพื่อนำไปใช้งานต่อไป สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการถอดรหัสแบบ Log-MAP สำหรับรหัสแบบเทอร์โบคอนวูลูชันและวิธีการแบบ Chase 2 สำหรับรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ โดยที่มีจำนวนรอบในการถอดรหัสมีค่าอยู่ระหว่าง 1-5 รอบ ในตารางที่ 5.1 แสดงตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการจำลองและเปรียบเทียบ

ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารประเภทนี้เมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบมาใช้งาน

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารระหว่างรหัสเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบ

	ตัวแปร	ค่าที่นำมาใช้งาน
ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง	วิธีการมอดูเลต	Bi-Phase
	ความกว้างพัลส์	0.75 nsec
	จำนวนของสัญญาณพัลส์	$N_s = 5$
	คาบเวลาเฟรม	$T_f = 1$ nsec
	วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณ	Time hopping
	อัตราการส่งข้อมูล	R = 200 Mbps
	ภาคเข้ารหัสของรหัสเทอร์โบ	เมตริกซ์ก่อกำเนิด
อัตราการเข้ารหัส		R = (1/3)
ขนาดของวงจรสลับข้อมูล		1024
วงจรสลับข้อมูล		Block interleave
ภาคถอดรหัสของรหัสเทอร์โบ	วิธีการในการถอดรหัส	Log-MAP
	จำนวนรอบของการถอดรหัส	1 to 5
ภาคเข้ารหัสของรหัสบล็อกเทอร์โบ	ประเภทของรหัสบล็อก	BCH code
	ขนาดของรหัสบล็อก	(31,21)
ภาคถอดรหัสของรหัสบล็อกเทอร์โบ	วิธีการในการถอดรหัส	Chase 2
	จำนวนรอบของการถอดรหัส	1 to 5
แบบจำลองของช่องสัญญาณ	ช่องสัญญาณที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อม	

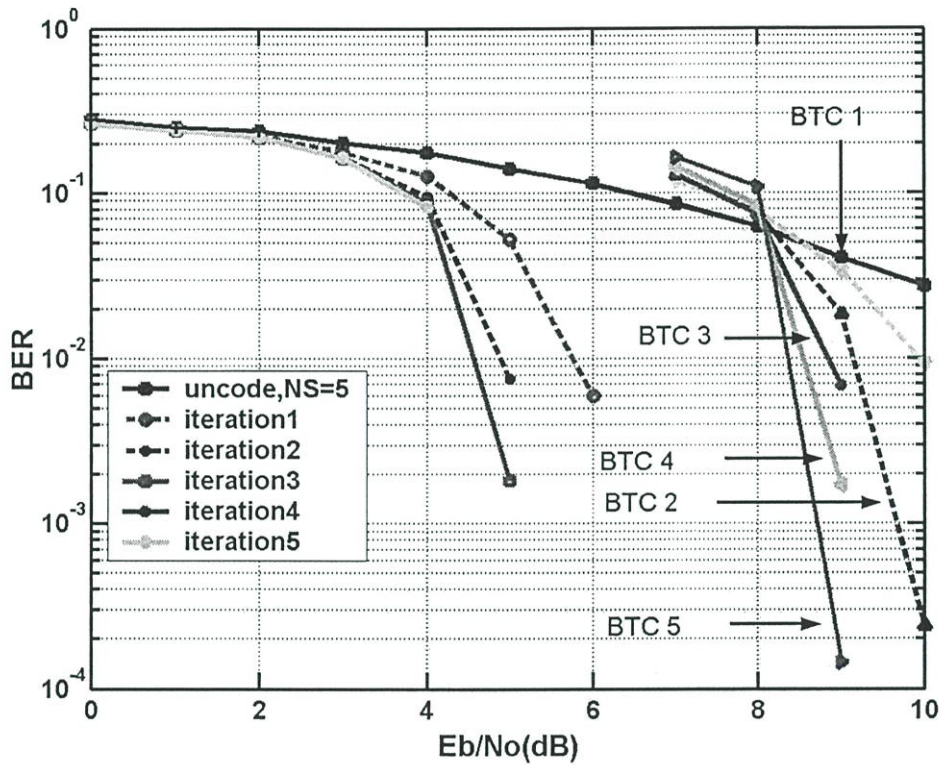
ในรูปที่ 5.2 จะแสดงผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการจำลองประสิทธิภาพของระบบที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้ โดยที่รูปที่ 5.2(A) จะแสดงผลตอบสนองของช่องสัญญาณและรูปที่ 5.2 (B) แสดงผลตอบสนองของช่องสัญญาณในลักษณะสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา



รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองของช่องสัญญาณในสภาวะที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อม รูป ก. ผลตอบสนองของช่องสัญญาณ รูป ข. ผลตอบสนองของช่องสัญญาณในลักษณะของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

ในรูปที่ 5.3 จะแสดงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบมาใช้ จากผลการจำลองจะพบว่าประสิทธิภาพของรหัสแบบเทอร์โบนั้นจะดีกว่ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบ โดยที่ในการจำลองครั้งนี้จะพิจารณาที่ระดับของความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่ระดับ  $10^{-3}$  โดยที่เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าของ BER ที่การวนรอบการถอดรหัสที่ 1 ระหว่างรหัสแก้ไขความผิดพลาดทั้ง 2 แบบจะพบว่ารหัสแบบเทอร์โบจะให้ค่าอัตราขยายไวด์เวอร์ซิตีเท่ากับ 4 dB และที่การวนรอบการถอดรหัสเท่ากับ 3 แล้วรหัสแบบเทอร์โบจะให้อัตราขยายไวด์เวอร์ซิตีเท่ากับ 4.5 dB แต่ทว่าจากผลการจำลองจะพบว่ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบที่

ระดับของพลังงาน  $\frac{E_b}{N_0}$  ที่ 7-8 dB นั้นทุกครั้งที่มีการถอดรหัสแบบวนซ้ำเพิ่มจำนวนรอบมาขึ้นค่า BER จะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากค่า Scaling factor ของรหัสแบบบล็อกเทอร์ที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้



รูปที่ 5.3 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบและบล็อกเทอร์โบ

### 5.3 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อใช้จำนวนพัลส์ที่ส่งซ้ำแตกต่างกัน

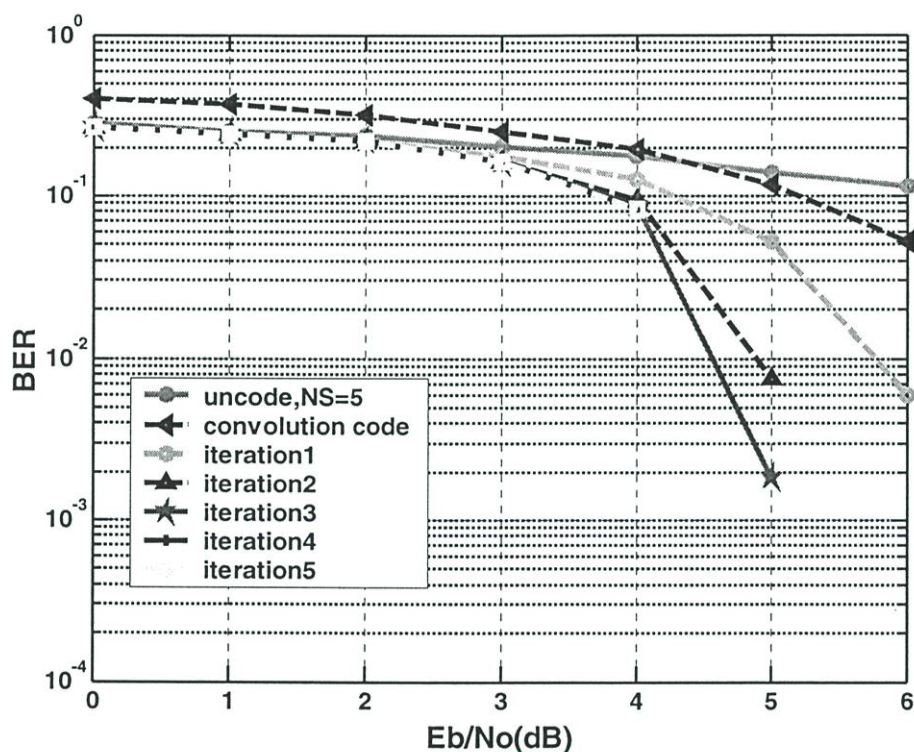
ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งาน ซึ่งบล็อกโคเดอเรมที่ใช้ในการจำลองระบบการสื่อสารนี้จะเหมือนกับที่ได้แสดงมาแล้วในรูปที่ 5.1 โดยทฤษฎีของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 2 และ 4 นั้นจะพบว่าค่าของพัลส์ที่ทำการส่งซ้ำ (Number of pulse repetition) นั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารประเภทนี้ โดยที่ในหัวข้อนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ในกรณีที่ใช้จำนวนของค่าพัลส์ที่ส่งซ้ำต่อข้อมูล 1 บิต เท่ากับ 5 และจำนวนของค่าพัลส์ที่ทำการส่งซ้ำเท่ากับ 10 ตามลำดับโดยที่ในแต่ละรูปจะทำการเปรียบเทียบระหว่างรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบเทอร์โบ รหัสแบบคอนโวลูชัน และระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ไม่ได้ทำการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด โดยที่ในส่วนของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะใช้ค่าเมตริกซ์ก่อกำเนิดเท่ากับ [15,17] และใช้วิธีการถอดรหัสแบบ Viterbi ซึ่งช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลนั้นจะเป็นช่องสัญญาณในสภาวะที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN และที่ภาครับของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจะใช้เครื่องรับแบบสหสัมพันธ์ ซึ่งรูปคลื่นของสัญญาณต้นแบบที่ใช้ในการคำนวณค่าสหสัมพันธ์นั้นจะใช้รูปคลื่นของสัญญาณบิต 1 และในตารางที่ 5.2 จะแสดงตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการจำลองระบบ

ตารางที่ 5.2 ตัวแปรที่สำคัญซึ่งใช้ในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่ความยิ่ง

	ตัวแปร	ค่าที่นำมาใช้งาน
ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง	วิธีการมอดูเลต	Bi-Phase
	ความกว้างของพัลส์	0.75 nsec
	จำนวนของสัญญาณพัลส์	$N_s = 5, 10$
	คาบเวลาเฟรม	$T_f = 1$ nsec
	วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณ	Time hopping
	อัตราการส่งข้อมูล	$R = 200, 100$ Mbps
	ภาคเข้ารหัสของรหัสเทอร์โบ	เมตริกซ์ก่อกำเนิด
อัตราการเข้ารหัส		$R = 1/3$
ขนาดของวงจรถลับข้อมูล		1024
วงจรถลับข้อมูล		Block interleave
ภาคถอดรหัสของรหัสเทอร์โบ	วิธีการถอดรหัส	Log-MAP
	จำนวนรอบของการถอดรหัส	1 to 5
ภาคเข้ารหัสของรหัสคอนโวลูชัน	Generator matrix	$g = [15, 17]$
	อัตราการเข้ารหัส	$R=1/2$
ภาคถอดรหัสคอนโวลูชัน	วิธีการถอดรหัส	Viterbi
แบบจำลองช่องสัญญาณ	ช่องสัญญาณที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อม	

### 5.3.1 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อ $N_s = 5$

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งาน และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ได้กับการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชัน และระบบการสื่อสารที่ไม่ได้ทำการเข้ารหัสช่องสัญญาณ ซึ่งผลการจำลองของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งของระบบนี้เมื่อใช้ค่า  $N_s = 5$  โดยที่ค่านี้จะใช้แทนจำนวนของพ็ลส์ที่ใช้แทนสัญญาณข้อมูล 1 บิต แสดงในรูปที่ 5.4

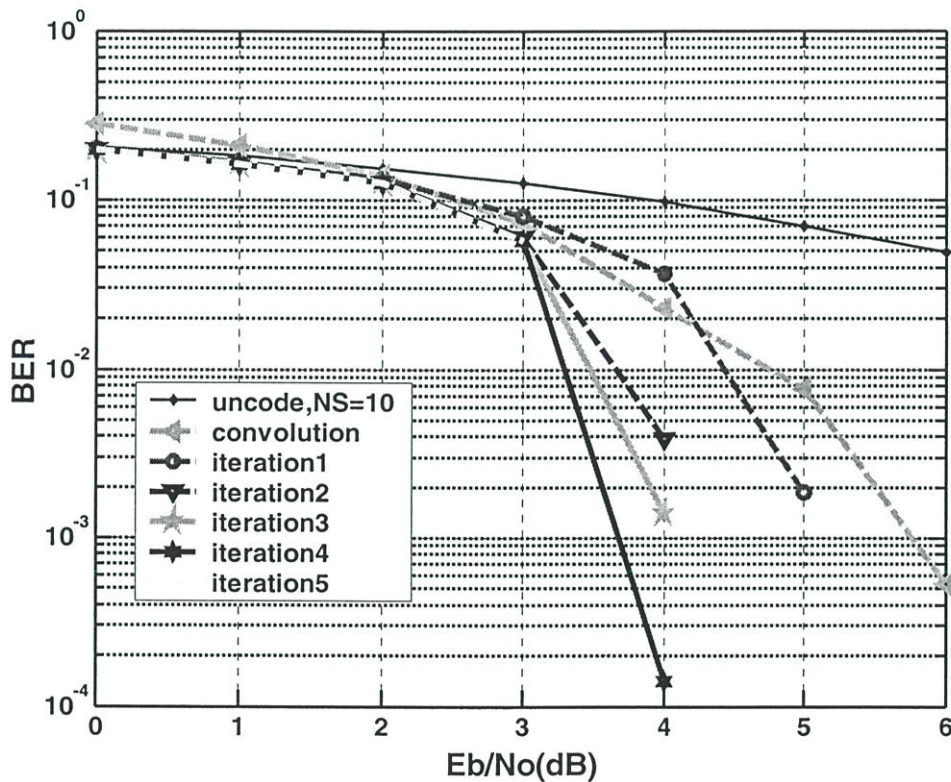


รูปที่ 5.4 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อค่า  $N_s = 5$

จากผลการจำลองในรูปที่ 5.4 จะพบว่าระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบการสื่อสารที่นำเอาการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชัน และระบบการสื่อสารที่ไม่ได้ใช้รหัสแก้ไขความผิดพลาด โดยที่ระดับของความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดที่ระดับ  $10^{-3}$  ที่ทำการพิจารณานี้จะได้ที่ระดับของค่าพลังงาน  $\frac{E_b}{N_0}$  เท่ากับ 5 สำหรับรอบของการถอดรหัสที่ 2 และ 3 โดยที่ในจำนวนรอบของการถอดรหัสที่ 4 และ 5 นั้นจะไม่เกิดค่าความผิดพลาดเป็น 0 ในค่าระดับพลังงาน  $\frac{E_b}{N_0}$  เดียวกัน

### 5.3.2 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อ $N_s = 10$

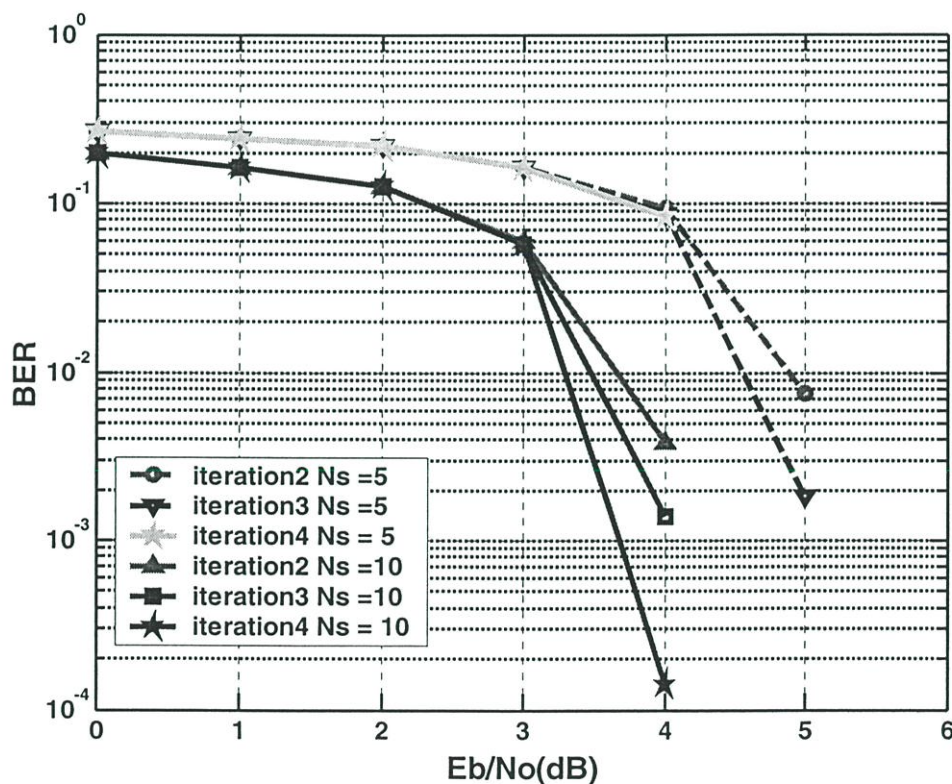
เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของจำนวนพัลส์ที่ใช้แทนค่าสัญญาณข้อมูล 1 บิตด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อกำหนดให้ค่า  $N_s = 10$  โดยที่ตัวแปรอื่นที่ใช้ในการจำลองยังคงเหมือนกับค่าที่แสดงในตารางที่ 5.2 ในรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง ซึ่งจากผลการจำลองของระบบการสื่อสารนี้จะพบว่าที่ระดับความผิดพลาด  $10^{-3}$  รหัสแบบเทอร์โบจะให้ค่าอัตราขยายไดเวอร์ซิตีเท่ากับ 2 dB ที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อ  $N_s = 10$

### 5.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อค่า $N_s = 5$ และ 10

ในส่วนของหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าของจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการส่งข้อมูล 1 บิต โดยที่ในรูปที่ 5.6 จะทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองระบบการสื่อสารนี้ ซึ่งจากผลการจำลองจะพบว่าที่ระดับของอัตราความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  จะพบว่าที่จำนวนรอบในการถอดรหัสเท่ากับ 3 และเมื่อใช้ค่า  $N_s = 10$  จะให้ค่าอัตราขยายไวด์เวอร์ซิติเท่ากับ 1 dB เมื่อทำการเทียบกับประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารนี้เมื่อใช้ค่า  $N_s = 5$  ดังนั้นจากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าของจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการแทนสัญญาณข้อมูลแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ทว่าจะส่งผลต่อค่าอัตราการส่งข้อมูลของระบบ ซึ่งจะหาได้จากสมการที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4



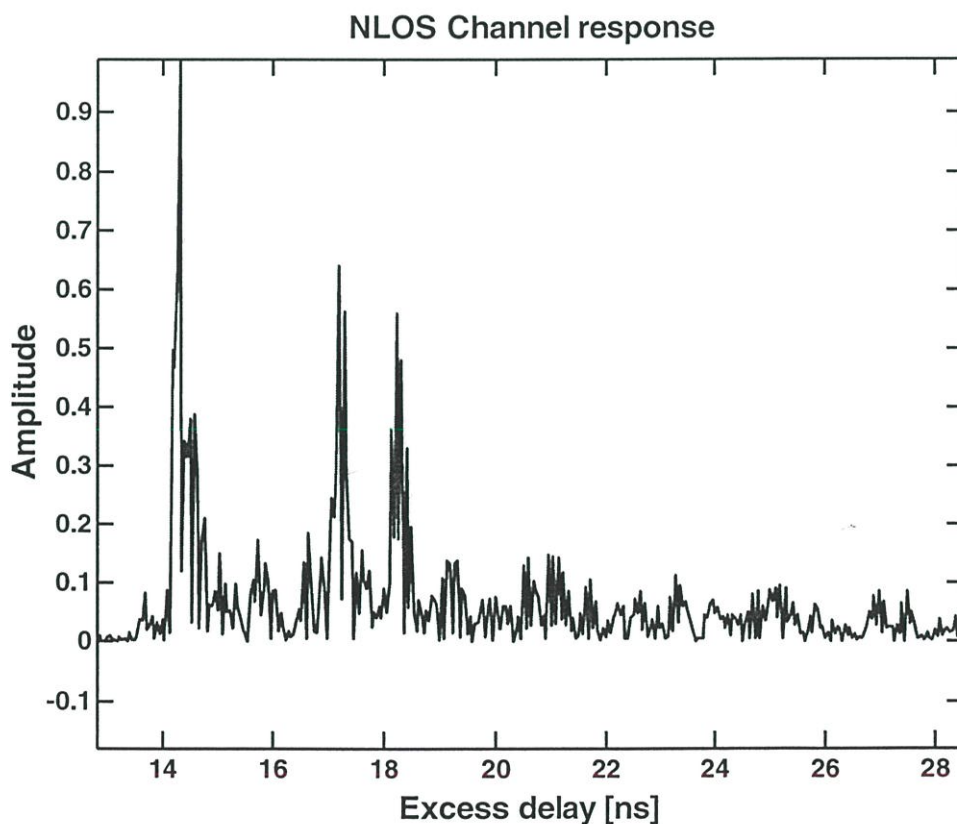
รูปที่ 5.6 ประสิทธิภาพของระบบเมื่อทำการเพิ่มค่าของ  $N_s$  จาก 5 เป็น 10

#### 5.4 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดปรับเปลี่ยนอัตราการส่งข้อมูลแตกต่างกันในสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำมาใช้ในสภาวะการทำงานที่ไม่เห็นเส้นสายตาหรือ ที่เรียกกันว่าช่องสัญญาณแบบ NLOS ซึ่งผลตอบแทนของช่องสัญญาณที่นำมาใช้นั้นจะได้จากการทดลองในบ้านพัก โดยที่ระยะห่างระหว่างด้านส่งและด้านรับมีค่าเท่ากับ 1 เมตร ซึ่งผลตอบแทนของช่องสัญญาณในสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS นั้นได้ถูกแสดงในรูปที่ 5.7 โดยที่จุดประสงค์ของการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าของคาบเวลาเฟรมว่ามีผลอย่างไรกับระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารในหัวข้อนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อกำหนดให้ค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 4 nsec และมีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 125 Mbps โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบการสื่อสารที่นำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบ และระบบการสื่อสารที่ไม่ได้ใช้การเข้ารหัส ส่วนที่สองคือผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบเมื่อค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 5 nsec และมีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps โดยที่ในส่วนสุดท้ายจะทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารประเภทนี้เมื่อใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบและเปลี่ยนแปลงค่าคาบเวลาเฟรม โดยที่ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นจะเหมือนกับค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2 โดยส่วนใหญ่ แต่ทว่าจะมีความแตกต่างของข้อกำหนดในส่วนของการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง แต่ในส่วนของการเข้ารหัสและถอดรหัสแบบเทอร์โบนั้นจะเหมือนเดิมกับค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2 และบล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารในการจำลองครั้งนี้จะมีลักษณะเหมือนกับรูปแบบการจำลองของระบบการสื่อสารในรูปที่ 5.1 โดยที่ในตารางที่ 5.3 จะแสดงค่าตัวแปรที่ของระบบการสื่อสารที่ใช้ในการจำลองที่แตกต่างไปจากค่าตัวแปรในหัวข้อก่อนที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 5.3 ค่าตัวแปรที่สำคัญในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่แตกต่างจากค่าในตารางที่ 5.2

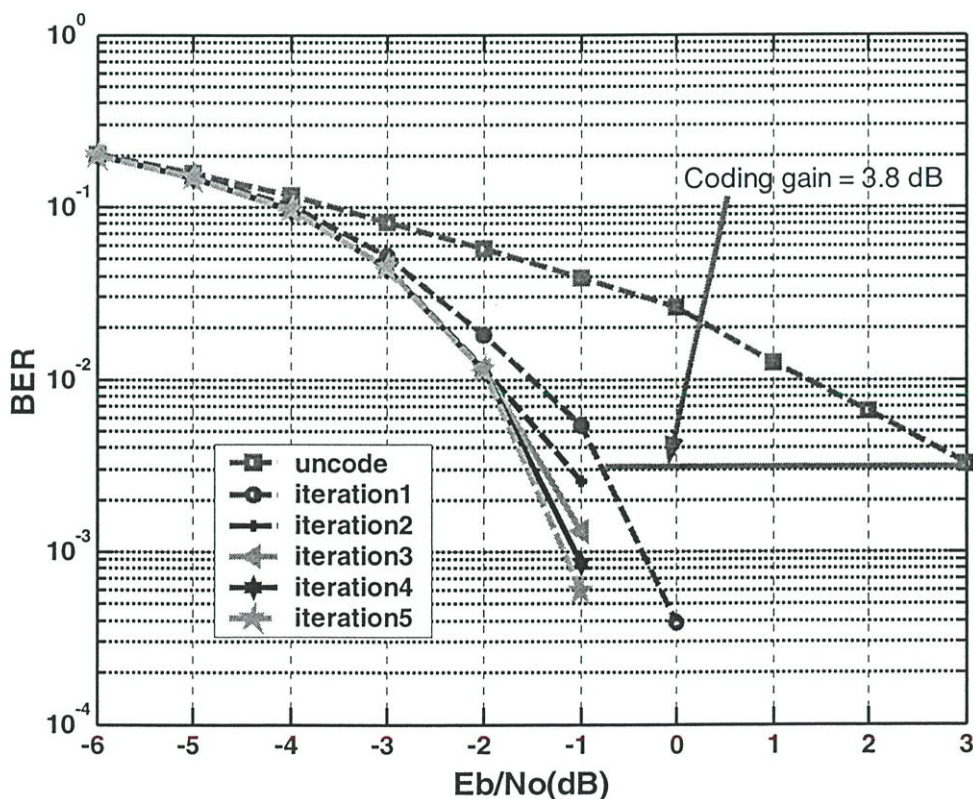
ระบบการสื่อสาร แบบแถบความถี่กว้างยิ่ง	ตัวแปร	ค่าที่นำมาใช้งาน
	วิธีการการมอดูเลต	Bi-Phase
	ความกว้างของพัลส์	0.75 nsec
	จำนวนของสัญญาณพัลส์	$N_s = 2$
	คาบเวลาเฟรม	$T_f = 4,5$ nsec
	วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณ	Time hopping
	อัตราการส่งข้อมูล	R = 125 ,100 Mbps
แบบจำลองช่องสัญญาณ	ช่องสัญญาณในสถานะที่ไม่เห็นเส้นสายตา + AWGN	



รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของช่องสัญญาณในสถานะแวดล้อมแบบ NLOS

#### 5.4.1 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดให้ค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 4 nsec ในช่องสัญญาณที่มีสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS

ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าของจำนวนของสัญญาณพัลส์ที่ใช้แทนสัญญาณข้อมูลดังที่ได้แสดงให้เห็นในหัวที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งยังขึ้นอยู่กับค่าของคาบเวลาเฟรมด้วยอันเนื่องมาจากระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ใช้วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบก้าวกระโดดทางเวลานั้นได้อาศัยหลักการของระบบการสื่อสารแบบแผ่สเปกตรัม (Spread spectrum communication) ซึ่งอัตราส่วนของการลดผลกระทบสัญญาณแทรกสอดจากสัญญาณแถบแคบจะเท่ากับ  $1/G_p$  เมื่อค่า  $G_p$  คืออัตราขยายการประมวลผลของระบบการสื่อสารแบบแผ่สเปกตรัม ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าของคาบเวลาเฟรม ซึ่งถ้าค่าของคาบเวลาเฟรมมีค่ามากแล้วจะส่งผลถึงค่าอัตราขยายการประมวลผลของระบบทำให้สามารถลดผลกระทบของการรบกวนของสัญญาณรบกวนได้และจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น

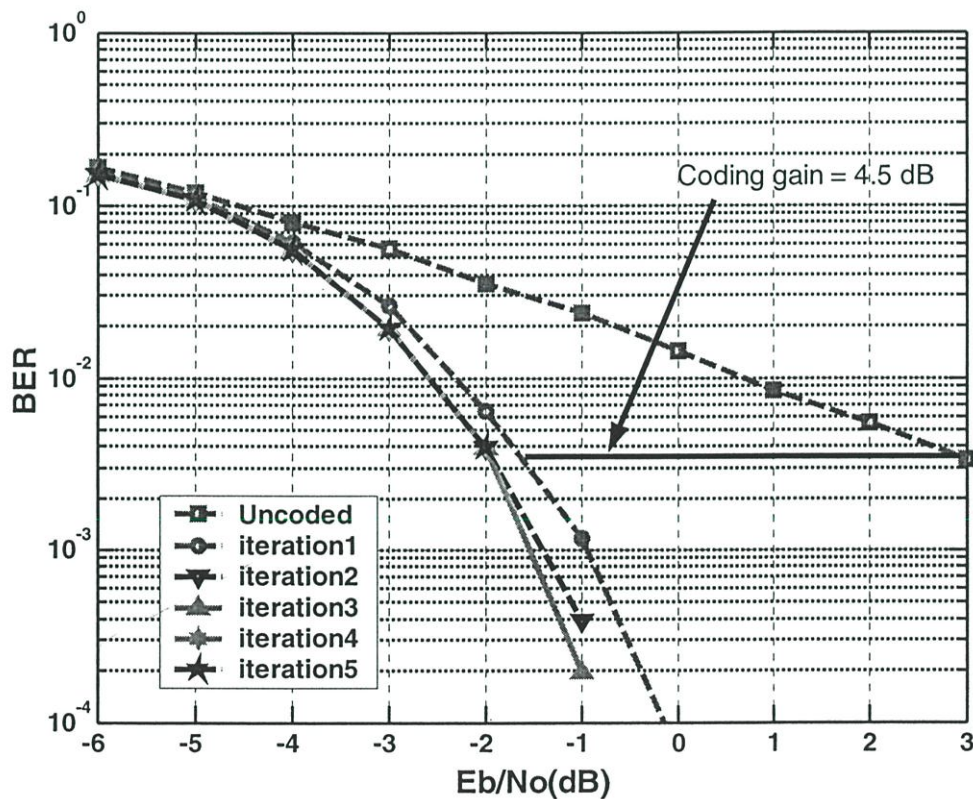


รูปที่ 5.8 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 4 nsec

โดยในรูปที่ 5.8 ได้แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่มีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 125 Mbps และมีค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 4 nsec จากผลการจำลองจะพบว่ารหัสแบบเทอร์โบจะให้ค่าอัตราขยายการเข้ารหัสเท่ากับ 3.8 dB ที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 1 รอบโดยที่ระดับของความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  โดยจากรูปที่ 5.8 นี้จะพบว่าค่าของ  $E_b/N_o$  ของระบบการสื่อสารนี้จะต่ำกว่าค่าที่ใช้ในช่องสัญญาณที่ไม่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่า  $E_b/N_o$  ต่ำกว่านั้นจะมาจากการเพิ่มค่าของคาบเวลาเฟรมของสัญญาณในระบบการสื่อสาร

#### 5.4.2 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดให้ค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 5 nsec ในช่องสัญญาณที่มีสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS

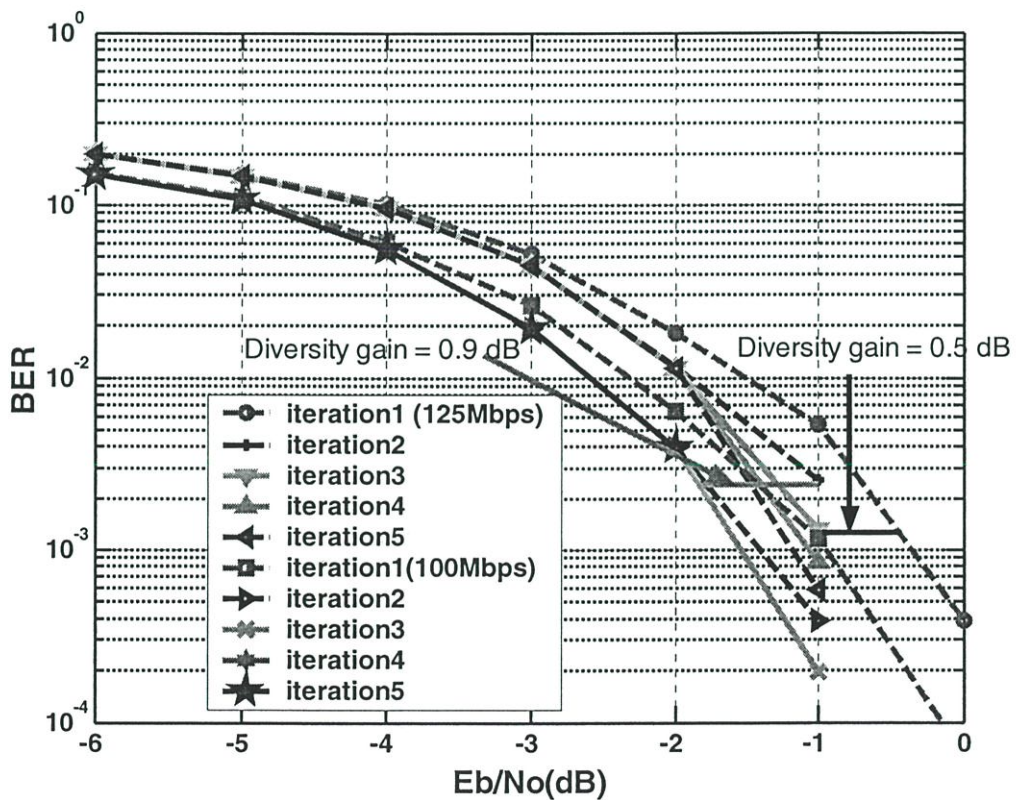
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของคาบเวลาเฟรมเป็น 5 nsec ซึ่งจะส่งผลทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลของระบบเท่ากับ 100 Mbps และทำการเปรียบเทียบกันระหว่างระบบการสื่อสารที่ทำการเข้ารหัสช่องสัญญาณด้วยรหัสเทอร์โบกับระบบการสื่อสารที่ไม่ทำการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาด โดยที่จะแสดงผลการจำลองของระบบการสื่อสารนี้ในรูปที่ 5.9 ซึ่งจากผลการจำลองจะพบว่าที่ระดับความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ทำการเข้ารหัสเทอร์โบจะให้ค่าอัตราการขยายการเข้ารหัสเท่ากับ 4.5 dB ที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 1 รอบ



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่ออัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps ( $T_f = 5$  nsec)

### 5.4.3 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าของคาบเวลาเฟรม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของคาบเวลาเฟรมจาก 4 nsec เป็น 5 nsec ซึ่งผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารจะแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งจากรูปนี้จะได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าของคาบเวลาเฟรมจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น โดยที่ระดับความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  นั้นที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 1 เมื่อทำการเพิ่มค่าของคาบเวลาเฟรมจาก 4 nsec ไปเป็น 5 nsec จะได้อัตราขยายไวด์เวอร์ซิติเท่ากับ 0.5 dB และที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 2 แล้วจะได้ค่าอัตราขยายไวด์เวอร์ซิติเท่ากับ 0.9 dB โดยทำการพิจารณาที่ระดับความผิดพลาดเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ้าทำการเพิ่มคาบเวลาเฟรมในการส่งแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น แต่ทว่าส่งผลทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลของระบบลดลง



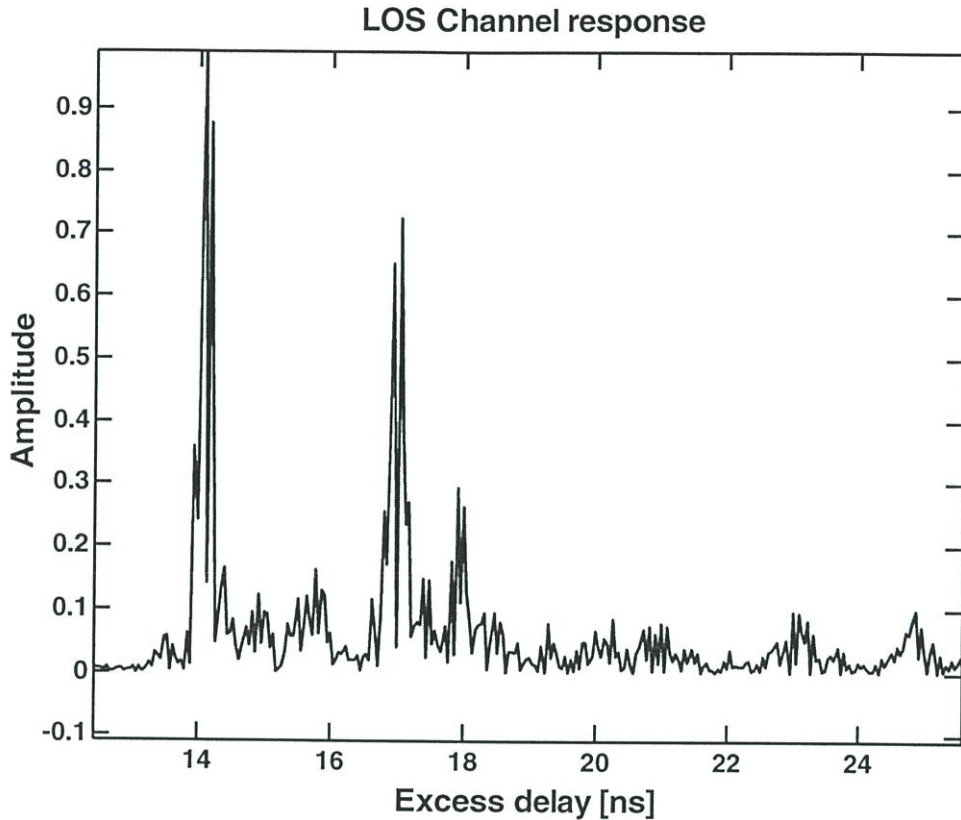
รูปที่ 5.10 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อทำการเพิ่มค่าคาบเวลาเฟรมในสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS

## 5.5 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดอัตรา การส่งข้อมูลแตกต่างกันในสภาวะแวดล้อมแบบ LOS

เนื่องจากการทำงานของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนั้นได้ถูกนำเสนอให้ใช้งาน ในระบบการสื่อสารที่ต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง และประยุกต์ใช้งานในระบบ WPAN และ WLAN เป็นต้น โดยที่การนำไปใช้งานในลักษณะนี้มีโอกาสที่สภาวะแวดล้อมระหว่างภาคส่งและ ภาครับเป็นแบบ LOS ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารประเภทนี้ เมื่อใช้ในสภาพแวดล้อมดังกล่าว โดยที่ในหัวข้อนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ ประสิทธิภาพของ ระบบเมื่อค่าของคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 4 nsec หรือ อัตรารับส่งข้อมูลเท่ากับ 125 Mbps ส่วนที่สองคือ แสดงผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบเมื่อค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 5 nsec หรืออัตราการรับส่ง ข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps และในที่สุดท้ายจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเมื่อทำการ เปลี่ยนค่าคาบเวลาเฟรม โดยที่ผลตอบสนองของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารนี้ในสภาวะ แวดล้อมแบบ LOS นั้นจะได้มาจากการทดลอง ซึ่งระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับเท่ากับ 1 เมตร และได้แสดงผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองในรูปที่ 5.11 และในตารางที่ 5.4 ได้ แสดงค่าตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่แตกต่างจากค่าตัว แปรที่ใช้ในตารางที่ 5.2 ซึ่งส่วนที่ต่างต่างนั้นจะอยู่ที่ค่าตัวแปรในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่ กว้างยิ่งแต่ที่ค่าตัวแปรที่ใช้ในรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบเทอร์โบนั้นจะคงเดิม และได้ใช้รูปแบบการ จำลองระบบการสื่อสารในรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.4 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองหาประสิทธิภาพของระบบที่แตกต่างจากตารางที่ 5.2

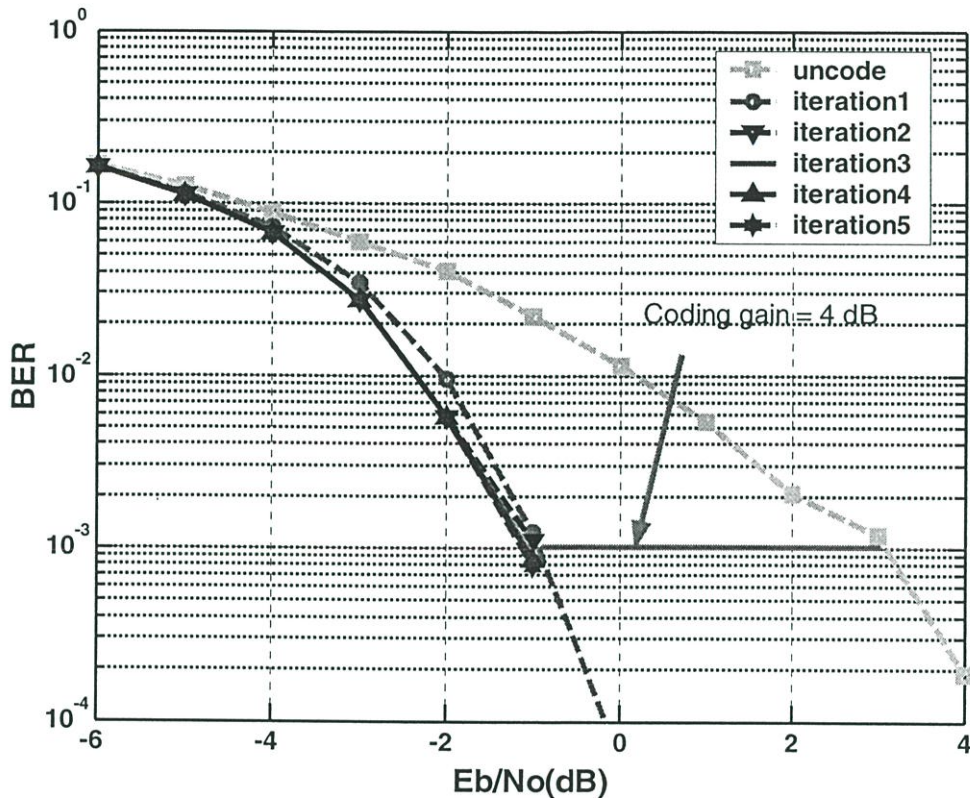
ระบบการสื่อสาร แบบแถบความถี่กว้างยิ่ง	ตัวแปร	ค่าที่นำมาใช้งาน
	วิธีการมอดูเลต	Bi-Phase
	ความกว้างของสัญญาณพัลส์	0.75 nsec
	จำนวนสัญญาณพัลส์	$N_s = 2$
	คาบเวลาเฟรมของสัญญาณ	$T_f = 4,5$ nsec
	วิธีการเข้าถึงช่องถึงช่องสัญญาณ	Time hopping
	อัตราการส่งข้อมูล	R = 125 ,100 Mbps
แบบจำลองช่องสัญญาณ	ผลตอบสนองของช่องสัญญาณในสภาวะเห็นเส้นสายตา+ AWGN	



รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของช่องสัญญาณในสถานะ LOS ที่ใช้ในการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสาร

5.5.1 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดให้ค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 4 nsec ในช่องสัญญาณที่มีสถานะแวดล้อมแบบ LOS

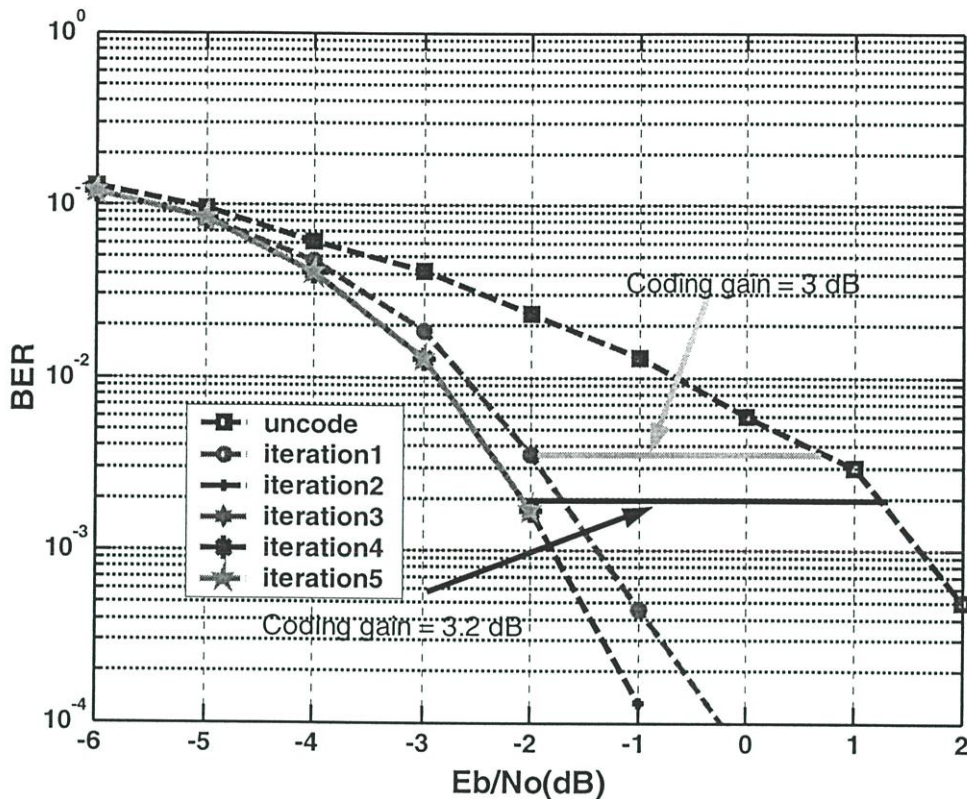
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำไปใช้ในสถานะแวดล้อมแบบ LOS โดยที่ผลการจำลองประสิทธิภาพจะแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งจากผลการจำลองจะพบว่าระบบการสื่อสารประเภทนี้เมื่อนำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบ เทอร์โบมาใช้งานจะให้ค่าอัตราการขยายการเข้ารหัสเท่ากับ 4 dB ที่ระดับความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  ที่จำนวนของรอบการถอดรหัสเท่ากับ 1 รอบ และได้อัตราการขยายการเข้ารหัสเท่ากับ 4.2 dB ที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 2 รอบ ในระดับความน่าจะเป็นการเกิดความผิดพลาดเดียวกัน



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมแบบ LOS โดยที่อัตราการรับส่งข้อมูลเท่า 125 Mbps

### 5.5.2 ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อกำหนดให้ค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 5 nsec ในช่องสัญญาณที่มีสภาวะแวดล้อมแบบ LOS

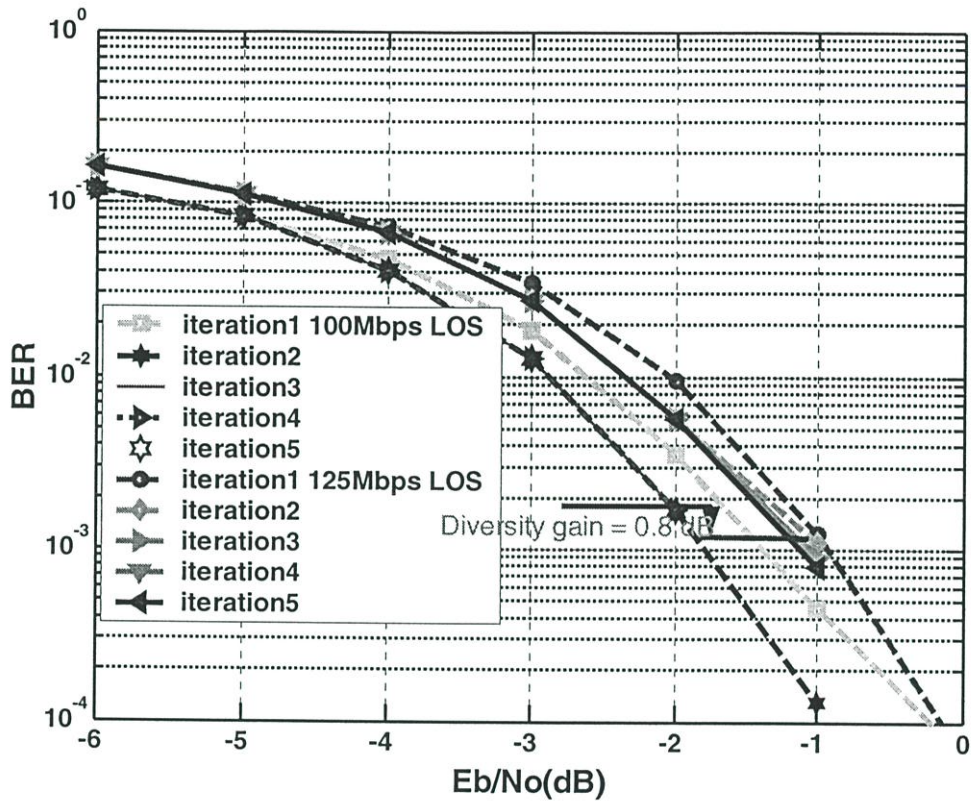
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่มีค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 5 nsec หรือมีอัตราการรับส่งข้อมูลของระบบการสื่อสารเท่ากับ 100 Mbps โดยจะแสดงผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารในรูปที่ 5.13 ซึ่งจากผลการจำลองจะพบว่าระบบการสื่อสารที่ใช้การเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบเทอร์โบจะให้อัตราขยายการเข้ารหัสเท่ากับ 3 dB ที่ระดับความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่ระดับ  $10^{-3}$  เมื่อจำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 1 รอบ และให้อัตราการขยายการเข้ารหัสเท่ากับ 3.2 dB สำหรับจำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 2 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อค่าคาบเวลาเฟรมเท่ากับ 5 nsec หรืออัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps

### 5.5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าคาบเวลาเฟรมในสถานะ LOS

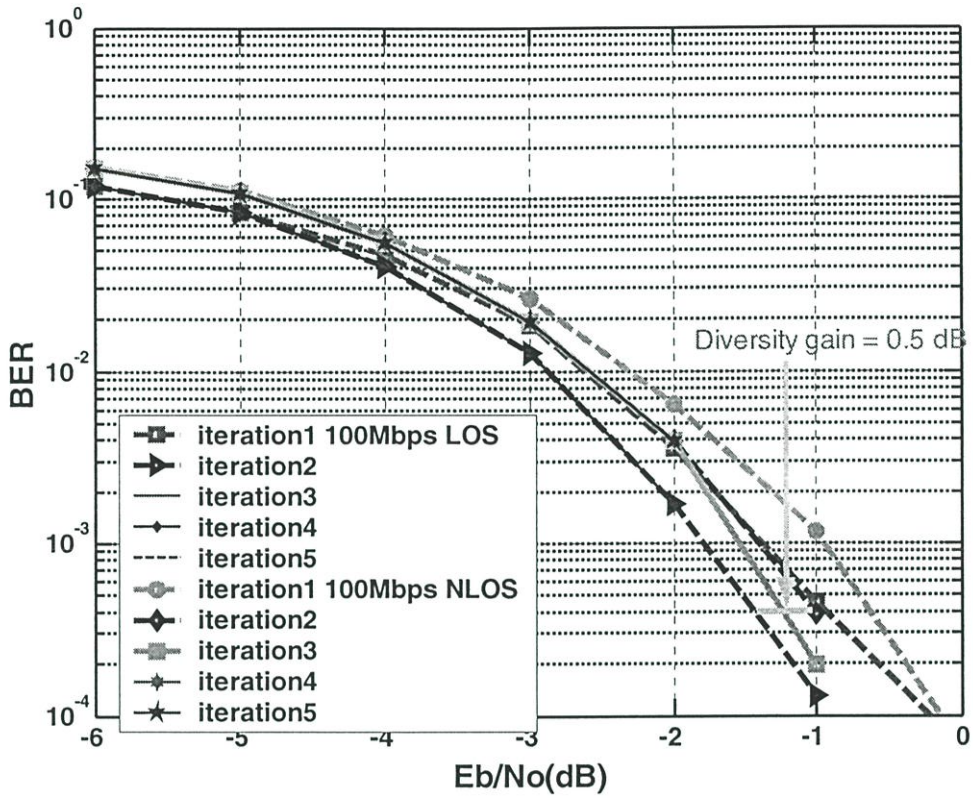
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่ใช้ในสถานะแวดล้อมแบบ LOS เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของคาบเวลาเฟรมจาก 4 nsec เป็น 5 nsec โดยจะแสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในรูปที่ 5.14 ซึ่งจากผลการจำลองจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าของคาบเวลาเฟรมแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบในด้านอัตราการเกิดความผิดพลาดดีขึ้น จากรูปที่ 5.14 ที่ระดับความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  เมื่อทำการเพิ่มค่าคาบเวลาเฟรมจาก 4 nsec ไปเป็น 5 nsec จะให้ค่าอัตราขยายไดเวอร์ซิตีเท่ากับ 0.8 dB ที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 2 รอบ ซึ่งจากผลการจำลองนั้นจะสอดคล้องกับผลการจำลองของระบบการสื่อสารในสถานะ NLOS ดังนั้นถ้าทำการเพิ่มค่าคาบเวลาเฟรมแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น



รูปที่ 5.14 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อทำการเพิ่มค่าความถี่พรมในสถานะแวดล้อมแบบ LOS

## 5.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งในสถานะ NLOS และ LOS

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งที่อัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 100 Mbps ในสถานะแวดล้อมแบบ NLOS และ LOS ตามลำดับ และในรูปที่ 5.15 จะแสดงผลการจำลองของระบบการสื่อสารนี้ ซึ่งจากรูปนี้จะพบว่าระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำไปใช้ในสถานะแวดล้อมแบบ LOS แล้วจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าในสถานะแบบ NLOS โดยที่ระดับความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  ระบบที่ทำงานในสถานะแวดล้อมแบบ LOS จะให้ค่าอัตราขยายไดเวอร์ซิตีเท่ากับ 0.5 dB ที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 2 รอบ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการทำงานในสถานะ NLOS



รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารเมื่อทำงานในสภาวะ NLOS และ LOS

## 5.7 การเพิ่มระยะการบริการของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงผลการจำลองของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งาน โดยในหัวข้อนี้จะประกอบด้วยกัน 2 หัวข้อคือ ระยะทางที่เพิ่มขึ้นของการบริการของระบบการสื่อสารประเภทนี้เมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้ในสภาวะแบบ NLOS และ LOS โดยที่ในการหาค่าของกำลังสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับของระบบการสื่อสารนั้นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_r(d) = P_t - PL(d) \quad (5.1)$$

โดยที่  $P_r(d)$  คือ กำลังของสัญญาณที่รับได้ ณ ระยะทางใดๆ

$P_t$  คือ กำลังของสัญญาณที่ภาคส่ง

$PL(d)$  คือ การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)

โดยที่การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากระยะทางในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งนี้สามารถหาได้จากสมการนี้

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5.2)$$

โดยที่  $PL(d_0)$  คือ กำลังงานที่สูญเสียที่ระยะทางอ้างอิง

$n$  คือ ค่า path loss exponential

ซึ่งค่า path loss exponential นี้จะเป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่นำเอาระบบการสื่อสารประเภทนี้ไปใช้งาน โดยที่ระยะทางอ้างอิงที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 1 เมตร ค่าของกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ภาครับของระบบการสื่อสารนั้นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_r = E_b R_b \quad (5.3)$$

เมื่อ  $E_b$  คือ ค่าพลังงานของสัญญาณต่อบิตที่รับได้ที่ภาครับ  
 $R_b$  คือ ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (bps)

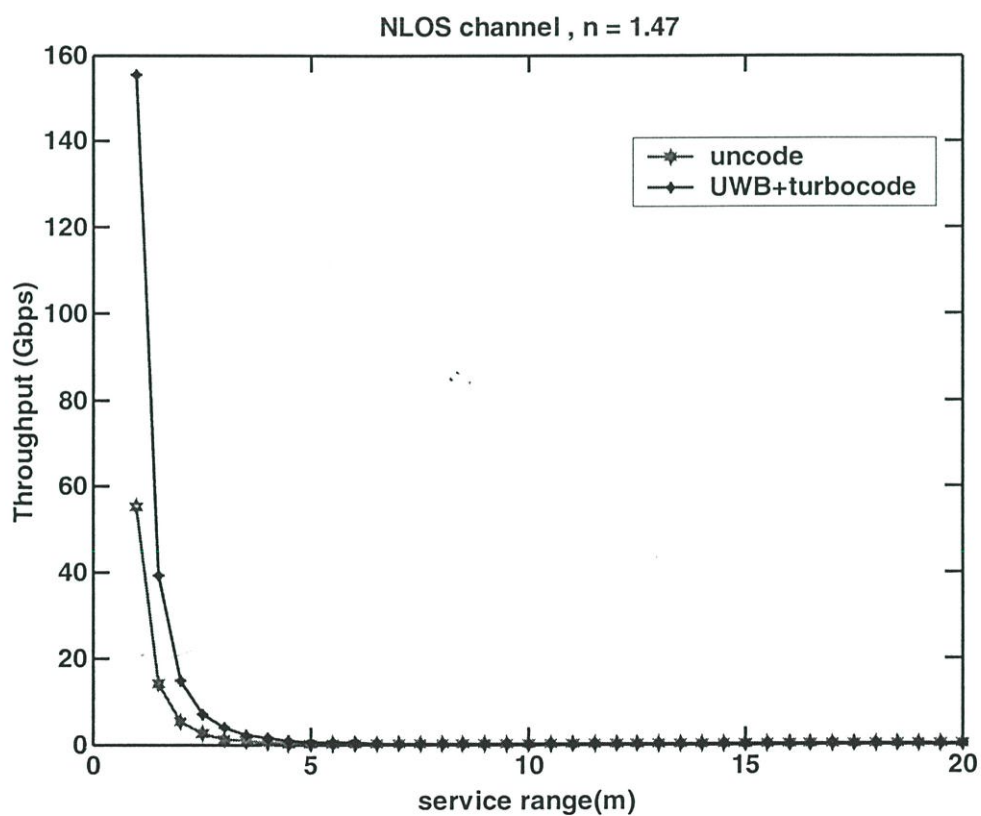
จากสมการทั้ง 3 ที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นนั้นสามารถนำมาประยุกต์หาความสัมพันธ์ของอัตราเร็วในการส่งข้อมูลกับระยะทางเมื่อทราบค่าของพลังงานของสัญญาณต่อบิตที่ต้องใช้เมื่อทำการกำหนดอัตราการเกิดความผิดพลาดในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งจะสามารถหาได้จากค่า  $E_b/N_0$  โดยที่ค่านี้ก็จะสามารถหาได้จากผลการจำลองที่ได้ในขั้นต้น เมื่อค่า  $N_0$  นั้นจะเป็นค่าของความหนาแน่นของกำลังของสัญญาณรบกวน

### 5.7.1 การเพิ่มระยะเวลาการบริการของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้ในงานในสภาวะแบบ NLOS

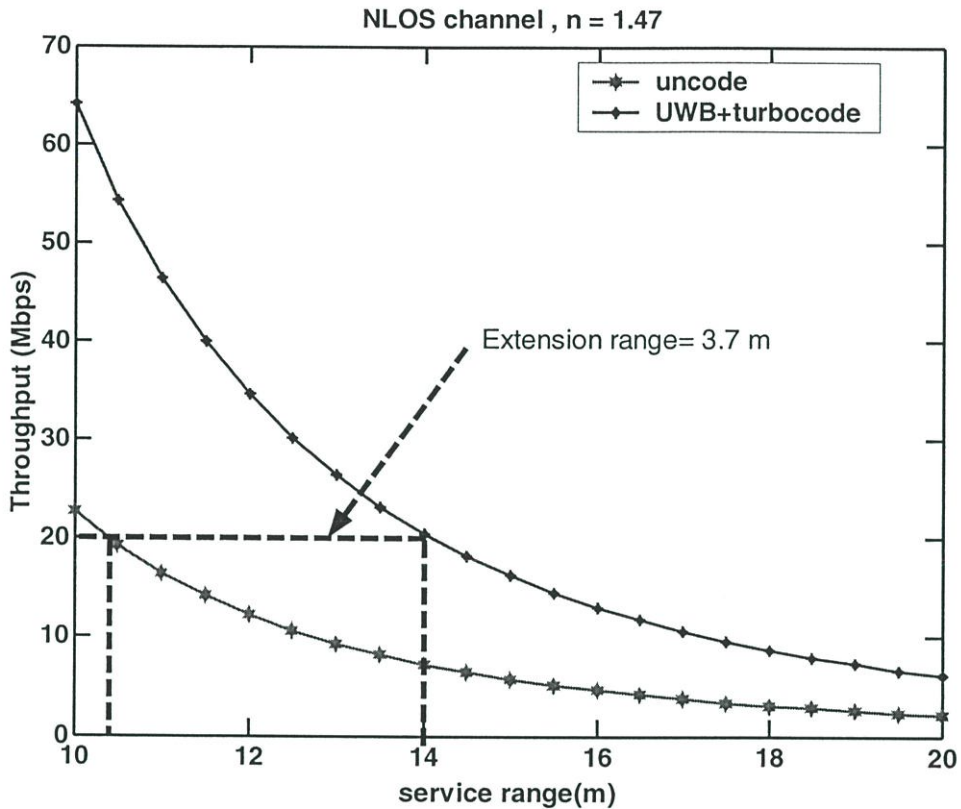
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงผลการจำลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งกับระยะทางในการส่ง เมื่อนำมาใช้ในสภาวะแวดล้อมการใช้งานแบบ NLOS ที่มีค่าของ path-loss exponential เท่ากับ 1.43 และจะแสดงตัวแปรที่ใช้ในการจำลองไว้ในตารางที่ 5.5 โดยที่ผลการจำลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.16 ซึ่งได้แสดงถึงแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการรับส่งข้อมูลกับระยะเวลาการบริการของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยที่จากผลการจำลองจะพบว่าระบบการสื่อสารจะมีค่าอัตราการรับส่งข้อมูลที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาการบริการเพิ่มขึ้น และในรูปที่ 5.17 จะแสดงผลการจำลองของค่าระยะเวลาการบริการที่เพิ่มขึ้นของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งโดยที่พิจารณาที่อัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 20 Mbps นั้นระบบที่นำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้จะให้ระยะเวลาการบริการเพิ่มขึ้น 3.7 เมตร โดยที่รูปทั้งสองนี้จะสามารถวาดได้จากสมการที่ (5.3) โดยนำเอาค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ของระบบการสื่อสารซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5.1)

ตารางที่ 5.5 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลกับระยะทางเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS

กำลังของสัญญาณส่ง	-2.56 dBm
ค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ระยะทางอ้างอิง $PL(d_0)$	55 dB
ค่าความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวน ( $N_0$ )	$1.593 \times 10^{-20}$ w/Hz
ค่าของ $\frac{E_b}{N_0}$ ที่ต้องการเมื่อกำหนดให้ BER < $10^{-3}$	-1.5 dB



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับส่งข้อมูลและระยะทางในสภาวะการใช้งานแบบ NLOS ( $n = 1.47$ )



รูปที่ 5.17 ค่าระยะการบริการที่เพิ่มขึ้นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาประยุกต์ใช้ในสภาวะแวดล้อมแบบ NLOS ( $n = 1.47$ )

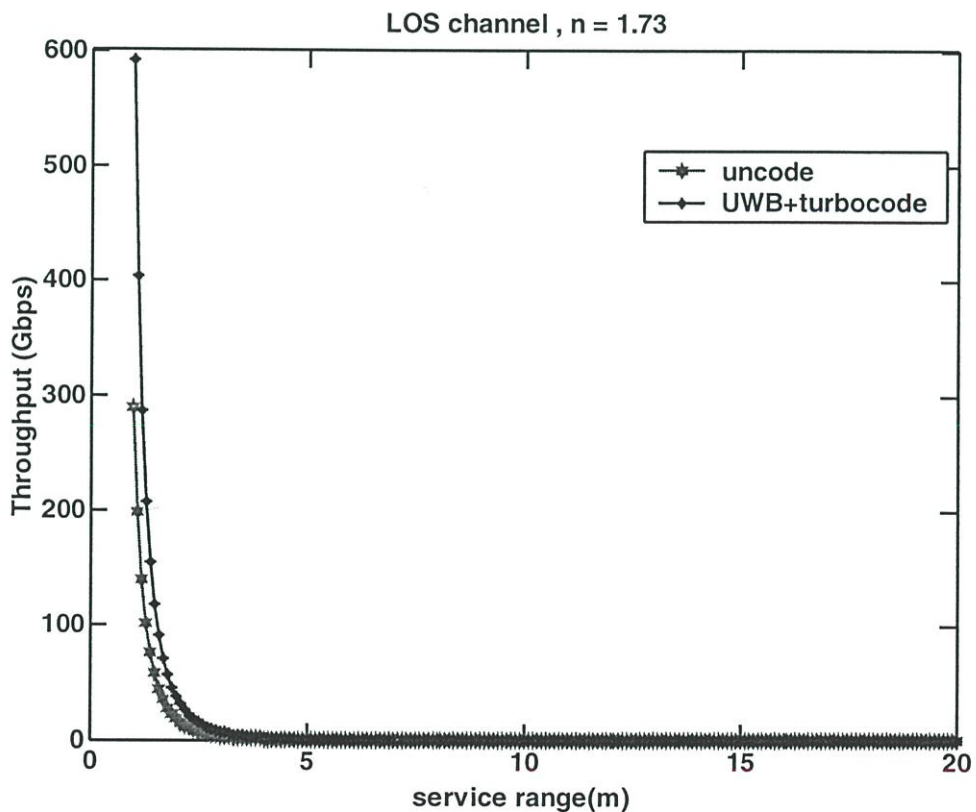
### 5.7.2 การเพิ่มระยะการบริการของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานในสภาวะแบบ LOS

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงผลการจำลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งกับระยะทางในการส่ง เมื่อนำมาใช้ในสภาวะแวดล้อมการใช้งานแบบ LOS ที่มีค่าของ path-loss exponential เท่ากับ 1.73 และจะแสดงตัวแปรที่ใช้ในการจำลองไว้ในตารางที่ 5.5 โดยที่ผลการจำลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.18 ซึ่งได้แสดงถึงแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการรับส่งข้อมูลกับระยะการบริการของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง โดยที่จากผลการจำลองจะพบว่าระบบการสื่อสารจะมีค่าอัตราการรับส่งข้อมูลที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะการบริการเพิ่มขึ้น และในรูปที่ 5.19 จะแสดงผลการจำลองของค่าระยะการบริการที่เพิ่มขึ้นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งโดยที่พิจารณาที่อัตราการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 20 Mbps นั้นระบบที่นำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้จะให้ระยะการบริการเพิ่มขึ้น 2.2 เมตร โดยที่รูป

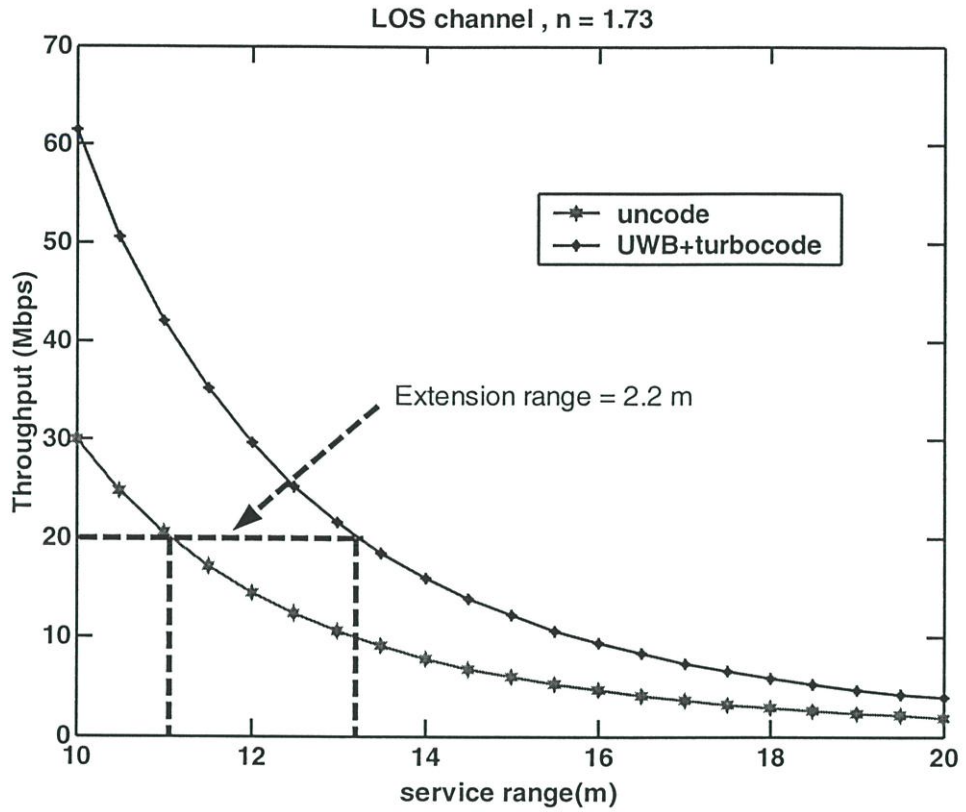
ทั้งสองนี้จะสามารถวัดได้จากสมการที่ (5.3) โดยนำเอาค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ของระบบการสื่อสารซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5.1) ตามลำดับ

ตารางที่ 5.6 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลกับระยะทางเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมแบบ LOS

ค่ากำลังของสัญญาณส่ง	-2.56 dBm
ค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่ระยะทางอ้างอิง $PL(d_0)$	50 dB
ความหนาแน่นของกำลังของสัญญาณรบกวน ( $N_0$ )	$1.593 \times 10^{-20} \text{ w/Hz}$
ค่าของ $\frac{E_b}{N_0}$ ที่ต้องการเมื่อกำหนดให้ BER < $10^{-3}$	-0.8 dB



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับส่งข้อมูลและระยะทางในสภาวะการใช้งานแบบ LOS ( $n = 1.73$ )



รูปที่ 5.19 ค่าระยะการบริการที่เพิ่มขึ้นของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาประยุกต์ใช้ในสภาวะแวดล้อมแบบ LOS ( $n = 1.73$ )

## บทที่ 6

# สรุปผลการจำลองและแนวทางในการพัฒนา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาและการประยุกต์ใช้งานการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดชนิดเทอร์โบที่นำมาใช้งานในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง รวมทั้งการออกแบบและสร้างแบบจำลองของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง รหัสแบบเทอร์โบ รหัสแบบบล็อกเทอร์โบ และรหัสแบบคอนโวลูชัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารประเภทนี้เมื่อเอาการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดมาใช้งาน และทำการส่งผ่านช่องสัญญาณประเภทต่าง ๆ โดยที่ในการจำลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ 1) ช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม 2) ช่องสัญญาณแบบเห็นเส้นสายตา และ 3) ช่องสัญญาณแบบไม่เห็นเส้นสายตา ตามลำดับ ในปัจจุบันนั้นระบบการสื่อสารไร้สายได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันมากขึ้นอันเนื่องมาจากหลายๆ ปัจจัย และมีความต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นในระบบการสื่อสารประเภทนี้เพื่อตอบสนองต่อการส่งข้อมูลประเภทมัลติมีเดีย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง (UWB Communication systems) ขึ้นมาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการนี้เพราะว่าระบบการสื่อสารประเภทนี้มีแบนวิidthของระบบการสื่อสารที่กว้างมากดังนั้นจึงสามารถส่งข้อมูลที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงมากได้ ซึ่งระบบการสื่อสารนี้ได้ถูกนำเสนอให้นำมาใช้ในระบบ WPAN หรือ IEEE 802.15.3a แต่ทว่าจากการที่ระบบการสื่อสารประเภทนี้ใช้แบนวิidthของระบบที่มีขนาดที่กว้างมากดังนั้นจึงไปซ้อนทับกับแบนวิidthของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเช่น WLAN GPS เป็นต้น ดังนั้นทาง FCC จึงได้มีการกำหนดระดับของความหนาแน่นกำลังของระบบการสื่อสารนี้ให้มีค่าไม่เกิน  $-41.3 \text{ dBm/MHz}$  ดังนั้นการนำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณมาใช้ในระบบการสื่อสารประเภทนี้ย่อมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ และจากคุณสมบัติของระบบที่นำเอาการเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดมาใช้งานนั้น ณ ระดับของความผิดพลาดเดียวกันระบบที่ใช้การเข้ารหัสจะใช้ค่ากำลังของสัญญาณที่ต่ำกว่า ดังนั้นที่ระดับของความผิดพลาดเดียวกัน และกำลังของสัญญาณเท่ากันแล้ว ระบบที่นำเอาการเข้ารหัสมาใช้ย่อมสามารถให้พื้นที่ในการบริการได้มากกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้การเข้ารหัสช่องสัญญาณ ดังนั้นการศึกษาถึงการนำเอาการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบเทอร์โบมาใช้งานในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งจึงมีความสำคัญต่อการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบการสื่อสารและพื้นที่ให้บริการของระบบการสื่อสารประเภทนี้

## วิเคราะห์ผลการจำลอง

จากผลการจำลองในบทที่ 5 พบว่ารหัสแบบเทอร์โบนั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบ ที่เงื่อนไขของระบบการสื่อสารด้วยกัน โดยที่รหัสเทอร์โบจะให้อัตราขยายไวด์เวอร์ซิติเหนือกว่ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบอยู่ 4.5 dB ที่จำนวนรอบของการถอดรหัสเท่ากับ 3 ทั้ง 2 รหัสแก้ไขความผิดพลาด โดยที่จากผลการจำลองจะพบว่าระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อทำการเพิ่มค่าของจำนวนพัลส์ที่ใช้ในการแทนสัญญาณข้อมูลแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น ซึ่งในการจำลองในบทที่ผ่านมาจะทำการเปลี่ยนค่าของจำนวนพัลส์ที่ใช้แทนสัญญาณจาก 5 ไปเป็น 10 นั้นจะทำให้ระบบที่ใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบมีค่าอัตราขยายไวด์เวอร์ซิติเท่ากับ 1 dB ในช่องสัญญาณแบบที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม และจากผลการจำลองในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่เห็นเส้นสายตาและในสภาวะที่ไม่เห็นเส้นสายตาจะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของคาบเวลาเฟรมแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยถ้าเพิ่มค่าของเฟรมเวลามากขึ้นแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น แต่ทว่าจะทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลของระบบลดลง ซึ่งจากผลการจำลองในบทที่ 6 นั้นจะให้ผลที่สอดคล้องกันทั้ง 2 ช่องสัญญาณ โดยในกรณีที่ทำการเปลี่ยนอัตราการรับส่งข้อมูลจาก 125 Mbps เป็น 100 Mbps แล้วระบบการสื่อสารที่ใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบจะให้ค่าอัตราขยายไวด์เวอร์ซิติเท่ากับ 0.9 dB สำหรับช่องสัญญาณในสภาวะที่ไม่เห็นเส้นสายตา และจะมีอัตราการขยายไวด์เวอร์ซิติเท่ากับ 0.8 dB สำหรับช่องสัญญาณในสภาวะที่เห็นเส้นสายตาตามลำดับ และจากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่เห็นเส้นสายตาและไม่เห็นเส้นสายตาแล้วจะพบว่าประสิทธิภาพของระบบจะแตกต่างกันไม่มากนักคือ ระบบการสื่อสารที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมที่เห็นเส้นสายตาจะให้อัตราขยายไวด์เวอร์ซิติเท่ากับ 0.5 dB ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบนี้เมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานจะให้ค่าประสิทธิภาพในด้าน BER ต่ำแม้ว่าจะนำมาใช้งานในสภาพแวดล้อมแบบ NLOS และจากผลการจำลองที่ได้ในบทที่ 5 นั้นจะพบว่าที่กำลังของสัญญาณเดียวกันแล้วระบบการสื่อสารที่นำเอาการเข้ารหัสเทอร์โบมาใช้นั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เพราะฉะนั้นในระบบการสื่อสารที่ใช้กำลังส่งของสัญญาณด้วยกันและที่คุณภาพของการสื่อสารด้วยกัน ซึ่งสามารถกำหนดจากระดับของความผิดพลาดนั้นระบบการสื่อสารที่ใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบสามารถให้ระยะในการบริการมากกว่าระบบการสื่อสารที่ไม่ใช้การเข้ารหัสช่องสัญญาณ โดยในกรณีที่นำเอาระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมาใช้ในสภาวะการใช้งานแบบ NLOS แล้วระบบการสื่อสารที่ใช้การเข้ารหัสแบบเทอร์โบจะให้ระยะการบริการที่เพิ่มขึ้นกว่าระบบที่ไม่ใช้อยู่ 3.7 เมตร และถ้านำไปใช้ในสภาวะการใช้งานจะให้ค่าระยะการ

บริการที่เพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 2.2 เมตร ณ ที่ระดับความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่  $10^{-3}$  โดยพิจารณาที่อัตราการรับส่งข้อมูลที่ 20 Mbps

### ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นมุ่งศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อนำเอาการเข้ารหัสแบบเทอร์โบมาใช้งานในสภาพแวดล้อมของการใช้งานต่างๆ เช่น ช่องสัญญาณแบบไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอก ช่องสัญญาณในสภาพแวดล้อมที่ให้เส้นสายตา และช่องสัญญาณในสภาพแวดล้อมที่ไม่เห็นเส้นสายตา รวมถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนพ็ลส์ที่ใช้ในการแทนสัญญาณข้อมูลและคาบเวลาเฟรมของระบบการสื่อสารแต่เพียงอย่างเดียว ยังไม่ได้้นำผลกระทบของการรบกวนกันระหว่างผู้ใช้ (Multiuser interference) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารด้วย ซึ่งในการศึกษาและวิจัยต่อควรนำมาพิจารณาด้วย รวมถึงการหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งเมื่อใช้วิธีในการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบ DS-SS และการศึกษาค่าตัวแปร Scale ของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบที่เหมาะสมกับระบบการสื่อสารประเภทนี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding : Turbo code," in *Proc. IEEE ICC 1993*, pp.1064-1070, 1993.
- [2] R. Pyndiah, A. Glavieux, A. Picart and S. Jacq, "Near-Optimum decoding of product codes," in *Proc. IEEE GLOBCOM'94*, Vol.1/3, pp.339-343, Nov.1994.
- [3] R. Prasad, "CDMA for wireless personal communication," Artech House, INC. 1996.
- [4] A. Hocquenghem, "Code correlations d'erreurs", *Chiffres*, vol. 2 pp. 147-156, 1959.
- [5] R.C. Bose and D.K. Ray-Chaudhuri, "On a class of error-correcting binary group codes", *Information and Control*, vol. 3, pp. 68-79, 1960.
- [6] I.S. Reed and G. Solomon, "Polynomial codes over certain finite field", *J. Soc. Indust. Applied Math.* Vol. 8, pp. 300-304, 1960.
- [7] P. Elias. "Coding for Noisy Channel", *IRE Conv. Record*, Part 4, pp. 37-47, 1955.
- [8] A.R. Forouzn, M. Nahiri-Kenari and J. A. Salehi, "Low-rate convolutionally encoded time-hopping spread apectrum multiple access systems," *Pro. IEEE PIMRC'00*, vol2, pp. 1555-1558, Sep 2000.
- [9] N. Yamamoto and T. Ohtsuki, "Adapative internally turbo-coded ultra wideband-impulse radio (AITC-UWB-IR) systems," *Proc. IEEE ICC'03*, pp.3535-3539, May 2003
- [10] K. Takizawa and R. Kohno, "Combined Iterative demapping and decoding for UWB-IR systems," *WPMC 2003*.
- [11] W. Cheol Chung and D. Sam Ha, "On the performance of bi-phase modulated UWB signals in a multipath channel," *VTC2003-spring*, pp. 1656-1658, April 2003.
- [12] V. Srinivasa Somayazulu, "Multiple access performance in UWB systems using time hopping vs. direct sequence spreading," *WCNC2002*, IEEE 2002 pp.522-525, March 2002

- [13] B. Vucetie and J Yuan. Turbo codes principle and application : Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] M. Z. Win, R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth time hopping multiples – access communications," *IEEE Trans. Commun .*, pp.679-691, no. 4, April 2000
- [15] S Win (M.), SCHOLTZ (R.), Impulse radio: How it work, IEEE COMMUNICATION LETTERS , vol. 2 , no 1 , pp10-12, January 1998
- [16] T.S.Rappaport. Wireless Communication :Principles and Practice. Prentice – Hall,Inc. 1996.
- [17] M.R.Soleymani,Yingzi Gao and U.Vilapornsawi. Turbo Coding For Satellite and Wireless Communication. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [18] John G.Proakis. Digital Communication. 4nd ed. McGRAW-Hall,Inc. 2001.
- [19] Stephen B. Wicker. Error Control Systems for Digital Communication and Storage. Prentice-Hall,Inc. 1995
- [20] ลัญฉกร วุฒิสวัสดิ์กุลกิจ "เทคโนโลยีโทรคมนาคม: ทฤษฎีข่าวสารและการเข้ารหัส" สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546
- [21] P. Rarkwande, P. Rawiwan and M. Chamchoy, "Turbo Coding for Bi-phase Modulation Time-Hopping UWB-IR Systems," The 1<sup>st</sup> ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2004),vol1, pp.61-64, May 2004.
- [22] P. Rerkwande, M. Chamchoy and P. Tangtisanon, "Turbo Coding for Bi-phase Modulated Time-Hopping UWB System over Time Dispersion Channel," accept from 27<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-27), vol2, pp.457-460, Nov 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ทฤษฎีสถิติและความน่าจะเป็น

## ภาคผนวก ก.

### ทฤษฎีสถิติและความน่าจะเป็น

เนื่องจากในการศึกษาถึงหลักการงานของวิธีการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบต่างๆ นั้นจะอาศัยหลักการทางทฤษฎีของสถิติและความน่าจะเป็นมาทำการอธิบายถึงประสิทธิภาพของรหัสแก้ไขความผิดพลาดและระบบการสื่อสาร ดังนั้นในภาคผนวกนี้จะทำการกล่าวถึงคำนิยามและพื้นฐานทางทฤษฎีสถิติและความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้อง โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติของความน่าจะเป็น ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข ทฤษฎีของเบย์ เป็นต้น

#### ก.1.1 ความน่าจะเป็น

พิจารณาการทดลองโดยการทอดลูกเต๋ากับจำนวนผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ในเอกภพสัมพัทธ์  $s$  ของการทดลองจะประกอบไปด้วยเซตที่มีสมาชิกของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ดังนี้

$$s = \{1,2,3,4,5,6\} \quad (ก.1)$$

โดยที่จำนวนเต็ม  $1, \dots, 6$  แสดงถึงจำนวนจุดบนหน้าลูกเต๋าค่าทั้ง 6 นี้เป็นสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์ของการทดลอง เหตุการณ์ที่เป็นเซตย่อยของ  $s$  จะประกอบไปด้วยสมาชิกที่เป็นส่วนหนึ่งของเอกภพสัมพัทธ์ของการทดลอง ดังจะแสดงได้ในตัวอย่างดังต่อไปนี้ของเหตุการณ์  $A$

$$A = \{2,4\} \quad (ก.2)$$

โดยที่สมาชิกของเซต  $A$  คือ  $\{2,4\}$  และคอมพลิเมนต์ของ  $A$  นั้นจะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์  $\bar{A}$  ซึ่งสมาชิกของคอมพลิเมนต์  $A$  จะเป็นสมาชิกทุกตัวที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์แต่ไม่อยู่ใน  $A$  เขียนได้เป็น

$$\bar{A} = \{1,3,5,6\} \quad (ก.3)$$

เหตุการณ์ 2 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถกล่าวได้เป็น เหตุการณ์ที่ไม่เกิดร่วมกัน (Mutually exclusive event) ถ้าเหตุการณ์ทั้ง 2 ไม่มีสมาชิกร่วมกัน เช่นถ้าเหตุการณ์  $B$  คือ

$$B = \{1,3,6\} \quad (\text{ก.4})$$

นั่นคือเหตุการณ์  $A$  และ  $B$  เป็นเหตุการณ์ที่ไม่เกิดร่วมกัน ในทำนองเดียวกันเหตุการณ์  $A$  และ  $\bar{A}$  ก็จะเป็นเหตุการณ์ที่ไม่เกิดร่วมกันด้วย

การยูเนียนของเหตุการณ์ 2 เหตุการณ์ จะเป็นเหตุการณ์ที่ประกอบไปด้วยสมาชิกรวมของเหตุการณ์ทั้ง 2 เช่นกำหนดให้เหตุการณ์  $C$  เป็น

$$C = \{1,3,6\} \quad (\text{ก.5})$$

ให้  $D$  เป็นเหตุการณ์ที่เป็นผลลัพธ์ของการยูเนียนกันระหว่างเหตุการณ์  $B$  และ  $C$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} D &= B \cup C \\ D &= \{1,2,3,6\} \end{aligned} \quad (\text{ก.6})$$

การอินเตอร์เซกชันของเหตุการณ์ 2 เหตุการณ์ จะได้เหตุการณ์ที่เป็นสมาชิกร่วมกันของเหตุการณ์ทั้ง 2 เช่นถ้าให้  $E = B \cap C$  แล้วจะได้ว่า

$$E = \{1,3\} \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อเหตุการณ์ทั้ง 2 เป็นเหตุการณ์ที่ไม่เกิดร่วมกันแล้วผลของการอินเตอร์เซกชันกันระหว่าง 2 เหตุการณ์จะได้เซตว่าง ( $\phi$ ) เช่น  $A \cap B = \phi$  และผลของการยูเนียนและอินเตอร์เซกชันนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับกรณีที่มีเหตุการณ์มากกว่า 2 เหตุการณ์ได้เช่นกัน

โอกาสของการเกิดเหตุการณ์ใดๆ คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์นั้น ซึ่งสอดคล้องกับสัจพจน์ดังต่อไปนี้

สัจพจน์ที่ 1  $P(A) \geq 0$  สำหรับทุกเหตุการณ์  $A$

สัจพจน์ที่ 2  $P(s) = 1$  สำหรับเหตุการณ์  $s$  เมื่อ  $s$  เป็นเซตของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในเอกภพสัมพัทธ์

ถ้า  $A_i$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots$  เป็นเหตุการณ์ที่เป็นเหตุการณ์ที่ไม่เกิดร่วมกันทั้งหมด ในเอกภพสัมพัทธ์  $s$  นั่นคือ

$$A_i \cap A_j = \phi \quad (\text{ก.8})$$

โดยที่  $i \neq j$  เมื่อ  $i, j = 1, 2, \dots$  ดังนั้นความน่าจะเป็นของยูเนียนของเหตุการณ์ที่เป็นเหตุการณ์ไม่เกิดร่วมกันดังกล่าวจะส่งผลทำให้

$$P\left(\bigcup_i A_i\right) = \sum_i P(A_i) \quad (\text{ก.9})$$

### ก.1.2 เหตุการณ์ร่วมและความน่าจะเป็นร่วม (joint event and joint probability)

เมื่อทำการทดลอง 2 การทดลองและทำการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ เช่นการทดลองทอยลูกเต๋า 2 ลูก 1 ครั้ง แล้วทำการพิจารณาผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ที่จะได้จากการทดลองครั้งนี้จะพบว่า มีผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด 36 สมาชิก ซึ่งในที่นี้จะแทนด้วยคู่อันดับ  $(i, j)$  โดยที่  $i, j = 1, 2, \dots, 6$  ถ้าในกรณีนี้กำหนดให้ความน่าจะเป็นที่ค่าต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นบนลูกเต๋ามีค่าเท่ากันแล้ว ความน่าจะเป็นจะเกิดเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งจากค่าที่เป็นไปได้ในเอกภพสัมพันธจะเท่ากับ  $1/36$  และจากการทดลองดังกล่าวจะสามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ร่วมระหว่าง  $j$  และ  $i$  ได้ ซึ่งจะถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์  $P(A_i, B_j)$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, n$  และ  $j = 1, 2, \dots, m$  ตามลำดับ ที่ซึ่ง  $i$  และ  $j$  เป็นจำนวนเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในเซตของการทดลอง  $A$  และ  $B$  ตามลำดับ ซึ่งความน่าจะเป็นร่วมจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

$$0 \leq P(A_i, B_j) \leq 1 \quad (\text{ก.10})$$

ถ้ากำหนดให้ผลลัพธ์ของเหตุการณ์  $B_j, j = 1, 2, \dots, m$  เป็นเหตุการณ์ที่ไม่เกิดร่วมกันแล้วจะได้ว่า

$$\sum_{j=1}^m P(A_i, B_j) = P(A_i) \quad (\text{ก.11})$$

และถ้าผลลัพธ์ของการทดลองทั้ง 2 เป็นเหตุการณ์ที่ไม่เกิดร่วมกันแล้วจะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i, B_j) = 1 \quad (\text{ก.12})$$

### ก.1.3 ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข

พิจารณาเหตุการณ์ร่วมกัน 2 เหตุการณ์คือ  $A$  และ  $B$  และมีความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ร่วมเป็น  $P(A, B)$  ถ้าสมมติให้เหตุการณ์  $B$  เกิดขึ้นแล้วและต้องการหาค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นของเหตุการณ์  $A$  ซึ่งจะเรียงค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์  $A$  เมื่อเกิดเหตุการณ์  $B$  แล้วว่าความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข ซึ่งสามารถแทนด้วยสัญลักษณ์  $P(A|B)$  ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P(A|B) = \frac{P(A, B)}{P(B)} \quad \text{เมื่อ } P(B) > 0 \quad (\text{ก.13})$$

ในทำนองเดียวกันความน่าจะเป็นของเหตุการณ์  $B$  เมื่อกำหนดให้เกิดเหตุการณ์  $A$  ได้ดังนี้

$$P(B|A) = \frac{P(A, B)}{P(A)} \quad \text{เมื่อ } P(A) > 0 \quad (\text{ก.14})$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (ก.13) และ (ก.14) ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$P(A, B) = P(A|B)P(B) = P(B|A)P(A) \quad (\text{ก.15})$$

ภาคผนวก ข  
วิธีการถอดรหัสแบบ Chase II

## ภาคผนวก ข

### วิธีการถอดรหัสแบบ Chase II

ในกระบวนการถอดรหัสของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบบล็อกเทอร์โบนั้นในส่วนของภาคถอดรหัสนั้นจะสามารถแบ่งวิธีการในการถอดรหัสได้เป็น 2 วิธีใหญ่คือ วิธีการถอดรหัสโดยอาศัยหลักการของแผนภาพ Trellis (Trellis – Base Decoder) และ วิธีการถอดรหัสที่อาศัยพื้นฐานพีชคณิต (Algebraic decoding algorithm of Augmented List Decoding) โดยที่วิธีการในการถอดรหัสแบบหลังนั้นจะเป็นที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการถอดรหัสของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการถอดรหัสที่น้อยกว่าวิธีการแบบแรก โดยที่วิธีการถอดรหัสที่อาศัยหลักการทางพีชคณิตนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ทว่าในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงวิธีการถอดรหัสแบบ Chase II ซึ่งแบบวิธีการที่ถูกนำเสนอให้นำมาประยุกต์ใช้กับรหัสแบบบล็อกเทอร์โบในครั้งแรกและได้นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

#### ข.1.1 วิธีการแบบ Chase II (Chase – II Algorithm)

วิธีการถอดรหัสแบบ Chase II นั้นเป็นวิธีการในการถอดรหัสของรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบบล็อก โดยมีการนำเอาข้อมูลช่องสัญญาณมาใช้ในกระบวนการถอดรหัสด้วย ถ้าสมมติให้ข้อมูลที่ถูกส่งมาจากภาคส่งคือ  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  และข้อมูลที่รับได้จากช่องสัญญาณจะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์  $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$  โดยที่ข้อมูลที่รับได้จากช่องสัญญาณนั้นจะถูกกำหนดโดย  $R = X + N$  เมื่อ  $N$  คือสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น  $\sigma$  ถ้าสมมติให้  $H = (h_1, h_2, \dots, h_n)$  เป็นข้อมูลดิจิทัลของข้อมูลที่รับได้จากช่องสัญญาณ  $R$  โดยที่ค่าข้อมูลดิจิทัล  $h$  ในตำแหน่งต่างๆ ของข้อมูลที่รับได้จะหาได้จาก

$$h_i = 0.5(1 + \text{sign}(r_i)) \quad \text{โดยที่ } h_i \in \{0,1\} \quad (\text{ข.1})$$

ถ้ากำหนดให้  $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$  เป็นข้อมูลที่เหมาะสมที่สุด (Optimum decision) แล้วขั้นตอนให้วิธีการถอดรหัสแบบ Chase II จะประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่า  $p = \left\lfloor \frac{\delta}{2} \right\rfloor$  ตำแหน่งที่มีค่าข้อมูลของ  $H$  ที่มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลน้อยสุด โดยจะหาได้จากข้อมูลที่ออกจากช่องสัญญาณ  $R$  เมื่อกำหนดให้  $\delta$  คือค่าระยะทางน้อยที่สุดของรหัส ในช่องสัญญาณแบบ AWGN ที่คงที่ (Stationary AWGN channel) นั้น ค่าความน่าเชื่อถือแบบนอร์มัลไลซ์ (normalize reliability) ของสมาชิกของ  $h_j$  จะกำหนดได้จาก  $|r_j|$
- 2) กำหนดรูปแบบของความผิดพลาด  $E$  โดยที่ทำการที่กำหนดค่าของตำแหน่งของรูปแบบความผิดพลาดที่เป็น 1 หรือ 0 ได้จากทำตำแหน่งที่พบว่ามีค่าความน่าเชื่อถือแบบนอร์มัลไลซ์ที่มีค่าน่าเชื่อถือต่ำสุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยที่จะมีจำนวนของรูปแบบความผิดพลาดทั้งหมดที่เป็นไปได้เท่ากับ  $2^{\lfloor \frac{\delta}{2} \rfloor}$  โดยจะรวมรูปแบบที่เป็นค่า 0 ทั้งหมดด้วย
- 3) กำหนดรูปแบบของการทดสอบ (Test patterns :  $T$ ) โดยที่สามารถหารูปแบบของการทดสอบจาก  $T = H \oplus E$  เมื่อ  $\oplus$  แทนสัญลักษณ์ของกระบวนการบวกแบบมอดูโล-2 (Modulo-2 addition)
- 4) นำเอารูปแบบของการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ไปทำการถอดรหัสแบบพิชคณิตและทำการเก็บไว้ในตัวแปร  $C$
- 5) ทำการตัดสินใจที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้กฎการตัดสินใจดังนี้

$$D = C^i \quad \text{if} \quad |R - C^i|^2 \leq |R - C^j|^2 \quad \forall l \in \left[ 1, 2^{\lfloor \frac{\delta}{2} \rfloor} \right], \quad l \neq i \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่  $C^i = (c_1^i, c_2^i, \dots, c_n^i)$  เป็นคำรหัสที่  $i$  ของคำรหัส  $C$  และค่าระยะทาง Euclidean ระหว่าง  $R$  และ  $C$  จะหาได้จาก

$$|R - C|^2 = \sum_{l=1}^n (r_l - c_l^i)^2 \quad (\text{ข.3})$$

โดยการประยุกต์ใช้งานวิธีการถอดรหัสแบบ Chase II มาใช้ในการถอดรหัสแบบรหัสผลคูณในแต่ละแถวและหลักของรหัสผลคูณ ซึ่งวิธีการถอดรหัสนี้จะเป็นวิธีการถอดรหัสที่ใกล้เคียงวิธีการถอดรหัสที่เหมาะสมที่สุด แต่อย่างไรก็ตามแต่วิธีการถอดรหัสแบบ Chase II ไม่ได้เป็นการ

รับประกัน ว่าค่ารหัสที่ได้จากวิธีการถอดรหัสวิธีนี้จะใกล้เคียงที่สุดกับข้อมูลที่ส่งมาจากภาคส่ง อันเนื่องมาจากเหตุผลที่ว่ารูปแบบของความผิดพลาดที่นำมาใช้ไม่ใช่รูปแบบของความผิดพลาดทั้งหมดที่เป็นไปได้ของค่ารหัส  $C$

ภาคผนวก ค

วิธีการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณ

## ภาคผนวก ค

### วิธีการทดลองเพื่อหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณ

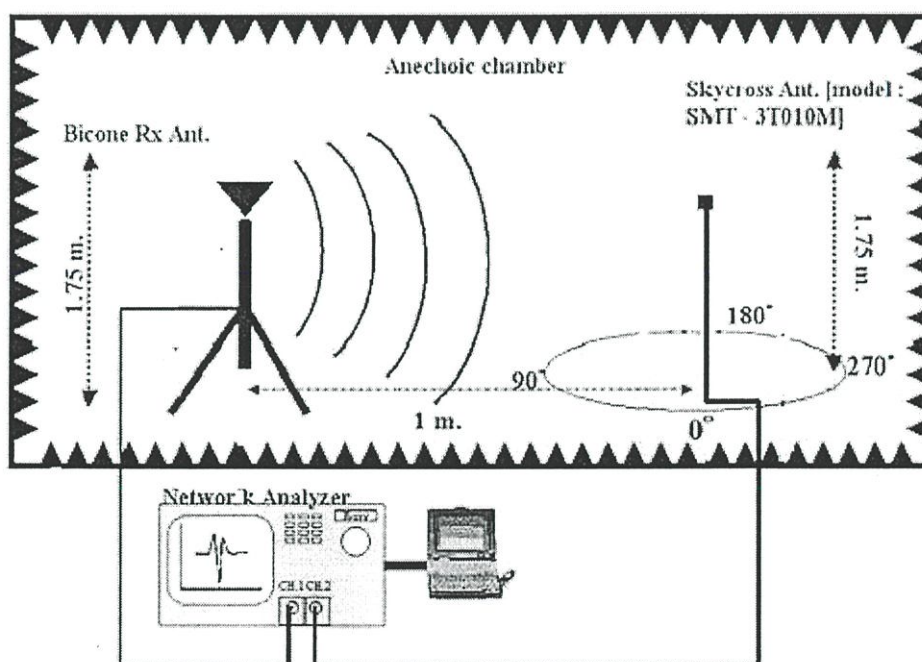
ในการทดลองหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองหาประสิทธิภาพในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ช่องสัญญาณคือ 1) ช่องสัญญาณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอก 2) ช่องสัญญาณที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เห็นเส้นสายตา (NLOS Channel) และ 3) ช่องสัญญาณที่อยู่ในสภาวะที่เห็นเส้นสายตา (LOS Channel) โดยที่ขั้นตอนในการทดลองหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณทั้งหมดนั้นจะเหมือนกัน ดังนั้นในภาคผนวกนี้จะนำเสนอเฉพาะวิธีการและขั้นตอนในการทดลองหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมเท่านั้น

#### ค.1.1 ขั้นตอนในการทดลอง

ในการทดลองหาผลตอบสนองของช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารนั้นจะนำเอาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ (Channel Transfer function) ที่ได้จากการทดลองมาผ่านกระบวนการแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ (Inverst fourier) โดยที่ในการวัดหาฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณนั้นจะได้จากการวัดค่า  $S_{21}$  ในโดเมนความถี่ที่เครื่อง Vector Network Analyzer (VNA) ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการวัดจะอยู่ในห้อง Chamber โดยที่จะใช้สายอากาศส่งแบบกรวยคู่ (Biconical antenna) และสายอากาศรับแบบ meander line และระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับจะเท่ากับ 1 เมตร ความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากับ 1.75 เมตร โดยที่ตารางที่ ค.1 จะแสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง และในรูปที่ ค.1 จะแสดงการกำหนดสภาพแวดล้อมในการวัดหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

ตารางที่ ค.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ช่วงของความถี่	3.1 - 10.6 GHz
จำนวนของตำแหน่งความถี่	1601
ช่วงไดนามิกของกำลัง	80 dB
ความสูงของสายอากาศส่ง	1.75 เมตร
ความสูงของสายอากาศรับ	1.75 เมตร
ระยะห่างระหว่างภาคส่งและภาครับ	1 เมตร



รูปที่ ค.1 การกำหนดสภาพแวดล้อมในการวัด

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างขั้นตอนของภาคเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบ

## ภาคผนวก ง.

### ตัวอย่างขั้นตอนของภาคเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบ

ในกระบวนการเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบนั้นจะประกอบด้วยภาคเข้ารหัสแบบบล็อก 2 วงจรมาทำงานต่อร่วมกันโดยวิธีการในการต่อวงจรนั้นจะประกอบด้วยกัน 2 แบบคือ แบบอนุกรม และแบบขนาน โดยที่ในภาคผนวกนี้นั้นจะอธิบายถึงขั้นตอนการเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบที่ทำการต่อร่วมกันแบบอนุกรม โดยใช้รหัสบล็อกแบบ BCH มาทำงานร่วมกับวงจรการสับเปลี่ยนของมูลแบบบล็อก (Block interleave) และกำหนดให้รหัสบล็อกแบบ BCH ที่นำมาใช้มีขนาด (7,15)

#### ง.1.1 ตัวอย่างการเข้ารหัสของรหัสแบบบล็อกเทอร์โบ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงตัวอย่างของการเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบที่ใช้รหัสบล็อกแบบ BCH ที่มีขนาด (4, 7) 2 วงจรการเข้ารหัสมาเป็นส่วนประกอบโดยจะทำการงานร่วมกับวงจรการสับเปลี่ยนข้อมูลแบบบล็อก โดยที่กระบวนการเข้ารหัสแบบบล็อกจะสามารถแสดงได้ในรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.7 การต่อแบบอนุกรมของรหัสแบบบล็อก

โดยกำหนดให้ข้อมูลที่นำมาเข้ารหัสแบบบล็อกเทอร์โบจะแสดงในสมการที่ (ง.1)

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (ง.1)$$

เมื่อนำเอาข้อมูลในสมการที่ (ง.1) มาผ่านกระบวนการเข้ารหัสบล็อกแบบ BCH ที่มีขนาดเท่ากับ (4,7) จะได้ผลลัพธ์ของการเข้ารหัสดังสมการที่ (ง.2)

$$\left[ \begin{array}{ccc|cccc} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right] \quad (ง.2)$$

ซึ่งข้อมูลที่อยู่ในกรอบจะเป็นส่วนของบิตตรวจสองที่ได้จากการเข้ารหัสบล็อกแบบ BCH ที่มีขนาด (4,7) จากนั้นจะนำเอาข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบบล็อกของวงจรวางแรกมาทำการส่งเข้าสู่กระบวนการสับเปลี่ยนข้อมูลแบบบล็อก ซึ่งจะได้ค่าเอาต์พุตของกระบวนการสับเปลี่ยนข้อมูลตามสมการที่ (ง.3)

$$\left[ \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (ง.3)$$

โดยที่ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการสับเปลี่ยนข้อมูลจะทำการส่งเข้าสู่กระบวนการเข้ารหัสบล็อกแบบ BCH ตัวที่ 2 ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับวงจรวางการเข้ารหัสตัวแรก และค่าเอาต์พุตที่ได้จากภาคเข้ารหัสตัวที่ 2 จะแสดงในสมการที่ (ง.3)

$$\left[ \begin{array}{ccc|cccc} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (ง.4)$$

โดยที่ข้อมูลในส่วนที่อยู่ในกรอบด้านขวามือนั้นจะเป็นข้อมูลที่เป็นบิตตรวจสองของข้อมูลข่าวสารที่ต้องการส่งกับบิตตรวจสองที่ได้จากวงจรวางการเข้ารหัสแบบบล็อก BCH ตัวที่ 1 และข้อมูลที่ได้จากสมการที่ (ง.4) จะเป็นข้อมูลที่ทำกรส่งออกไปสู่ช่องสัญญาณ

ภาคผนวก จ.

## บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] P. Rarkwande, P. Rawiwan and M. Chamchoy, "Turbo Coding for Bi-phase Modulation Time-Hopping UWB-IR Systems," The 1<sup>st</sup> ECTI Annual Conference (ECTI-CON 2004), vol1, pp.61-64, May 2004.
- [2] P. Rerkwande, M. Chamchoy and P. Tangtisanon, "Turbo Coding for Bi-phase Modulated Time-Hopping UWB System over Time Dispersion Channel," accept from 27<sup>st</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-27), vol2, pp.457-460, Nov 2004.



**ECTI Conference**

**2004**



**ECTI**  
Association

**Proceedings of The First Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) Annual Conference**

**May 13-14, 2004**

**Amari Orchid Resort, Pattaya, Choburi, THAILAND**

IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY  
THAILAND CHAPTER



IEEE THAILAND CHAPTER

IEEE CAS Society

ECTI-21  
AN ECCE



IEEE LEOS  
THAILAND CHAPTER



# Turbo Coding for Bi-Phase Modulated Time Hopping UWB-IR System

108

Ponlapat Rarkwande, Panarat Rawiwan, and Monchai Chamchoy

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
Tel: +66 2 7372500-47 Ext. 5140 Fax: +66 2 3264176  
E-mail: {s5061099, kcmoncha, krpanara}@kmitl.ac.th

## ABSTRACT

Ultra-wideband impulse radio (UWB-IR) system transmits and receives signal by using extremely short pulse duration instead of continuous wave. Generally, several repetition pulses are used to represent each data symbol for preventing of the detection error caused by multipath propagation. In this paper, the BER performance of the turbo coding for the time hopping UWB-IR system over the two-rays propagation channel is estimated through the simulation. As the simulation results, we show that the BER performance can be injured by multipath propagation and multiple access interferences. So, the combination of turbo coding and time hopping UWB-IR system can reduce the number of the repetition pulse and also the better BER performance can be obtained.

**Keywords:** Turbo coding, ultra-wideband communication, impulse radio

## 1. INTRODUCTION

Recently, Ultra Wideband Impulse Radio (UWB-IR) has attracted much attention in high speed wireless communication i.e., Wireless Personal Area Networks (WPANs) [1]. Generally, the UWB-IR system repeats the transmitted pulses for each data bit. The ultra-short pulses with duration less than nanosecond, called monocycle, are transmitted over several GHz. To prevent the interference with the existing systems, the transmission power of the signal is limited under thermal noise power. Therefore, it is essential to use several techniques in order to detect such a signal. Forward error correction (FEC) coding is considered as the promised technique to reduce the detection error and increase the reliability in the UWB-IR system.

Turbo coding firstly proposed in 1993 [2] has much attention in many communications areas. It can achieve low error rate at very low signal-to-noise ratios (SNRs) and this performance in terms of the bit error rate (BER) is close to the Shannon limit. Hence, turbo codes have been applied to many applications of radio wireless communication, deep space communication, optical communication, magnetic recoding and so on. Consequently, it can be possible to introduce the use

of the turbo code on UWB communication to extend the operating range and increase the reliability of the system.

Previously, the performance of FEC coding scheme with the UWB-IR systems has been proposed. The turbo code with pulse position modulation (PPM) in AWGN channel is used in [3]. The performance of the proposed system showed that the turbo codes can reduce the number of repetition codes while provide the better BER. Nevertheless, the performance of the bi-phase modulation (BPM) for the UWB communication system is better than that of the PPM in several aspects such as the smoother power spectral density and the higher resistance to jitter [4]. Therefore, the combination of the BPM with the turbo code for the UWB communication system is interested. In this paper, the turbo code in combination with the BPM for the time hopping UWB-IR system over the multipath propagation channel is considered. We evaluate the performance of the systems by the computer simulation. As the results, we can observed that the BER of the UWB-IR system using the turbo code is better than that using only the repetition code on a multipath channel. In addition, it can decrease the number of pulse repetitions and achieve the better BER.

## 2. UWB-IR SYSTEM

### 2.1 UWB-IR Transmitter

UWB-IR transmitter sends  $N_s$  pulse for each data bit. These pulses are located apart in sequence frames, each with duration  $T_f$ , hence, the bit rate equals to  $R_s = 1/(N_s T_f)$ . The modulation of UWB-IR in this system is the bi-phase modulation where the pulses corresponding to bit 1 have opposite pole of bit 0. In the time hopping (TH) multiple access systems, a location of a pulse in each frame is determined by the user dedicate pseudorandom sequence. The transmitted signal for the  $k$ th user is

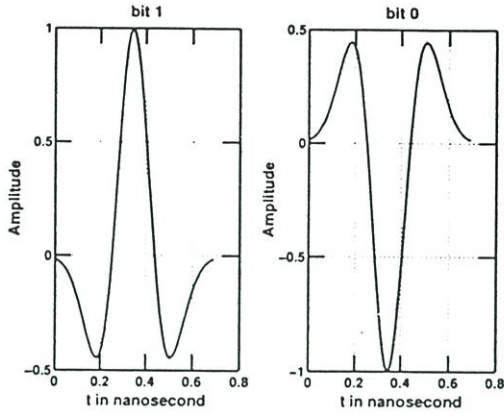


Fig.1: The transmitted signal waveform.

$$s_{tr}^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} D_{(j/N_s)}^{(k)} w_{tr} \left( t - jT_f - c_j^k T_c - \delta \left( \frac{1 - D_{(j/N_s)}^{(k)}}{2} \right) \right), \quad (1)$$

where the index  $j$  indicates the frame number,  $w_{tr}(t)$  represents the transmitted monocycle pulse,  $t$  is the transmitter clock times,  $c_j^{(k)}$  is the dedicated pseudorandom sequence of user  $k$ th with integer components. The integer number can change from 0 to  $N_h - 1$ ,  $T_c$  is the chip duration of the pseudorandom TH sequence. Frame duration time  $T_f$  is relatively much larger than chip duration time  $T_c$ , such that  $N_h T_c < T_f$ . This fact guaranties that in each frame one and only one pulse will be transmitted and  $D_{(j/N_s)}^{(k)}$  is the binary sequence of transmitted symbols ( $\pm 1$ ) corresponding to the  $k$ th user, The notation  $[x]$  denotes the integer part of  $x$  and the pulses corresponding to bit "0" are sent in  $\delta$  seconds latter than pulse corresponding to bit "1" Fig. 1 shows the transmitted signal waveform.

## 2.2 UWB-IR Receiver

1) *Receiver Signal Waveform*: A transmitted signal passes through the propagation channel including the transmitter and receiver antennas. We assume that  $N_u$  transmitters are active in the multiple-access system and the transmitter and the receiver are perfectly synchronized. Then, the total received signal is

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} A_k s_{rec}^{(k)}(t - \tau_k) + n_{tot}(t), \quad (2)$$

where  $A_k$  represents the amplitude of the received signal from the  $k$ th transmitter,  $\tau_k$  represents the delay corresponding to the  $k$ th user and  $n_{tot}(t)$  is the total receiver noise. The received signal waveform in the

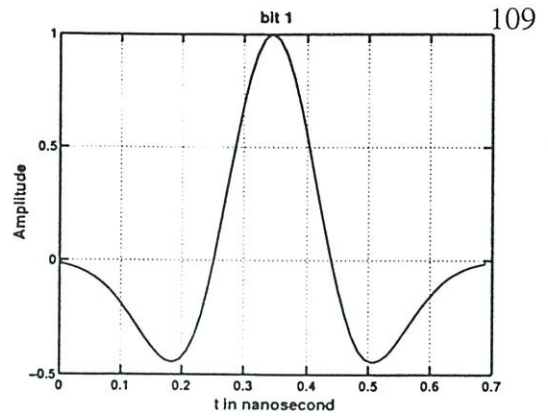


Fig.2: The received signal waveform (bit 1).

ideal channel and antenna system is showed in Fig. 2. The received waveform can be written as

$$w_{rec}(t) = \left[ 1 - 4\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right] \exp \left[ -2\pi \left( \frac{t}{\tau_m} \right)^2 \right], \quad (3)$$

where  $\tau_m = 0.2877$  ns, then the pulse width is  $T_w \approx 0.75$  ns. In this simulation, we assume that the system is perfect correlation.

2) *Receiver Signal Processing*: The receiver of UWB-IR considers the receiver signal  $r(t)$  and decide whether the receive bit is "0" or "1" based on an observation of receiver signal in time duration  $T_s = N_s T_f$  that in the decided bit, it uses correlation receiver signal with the template signal. It decide  $D_0^{(1)} = 0 \Leftrightarrow$

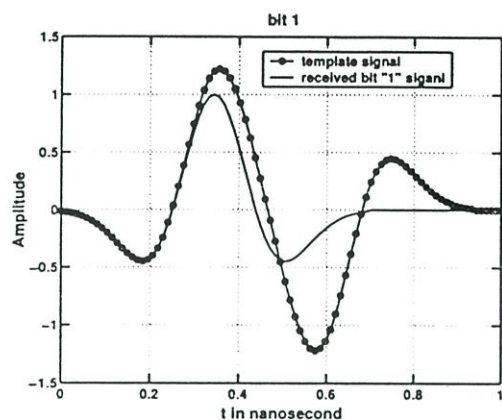
$$\sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau_1 + jT_f}^{\tau_1 + (j+1)T_f} r(t) v(t - \tau_1 - jT_f - c_j^{(1)} T_c) dt < 0 \quad (4)$$

where  $v(t) \equiv w_{rec}(t) - w_{rec}(t - \delta)$  represents the template signal.

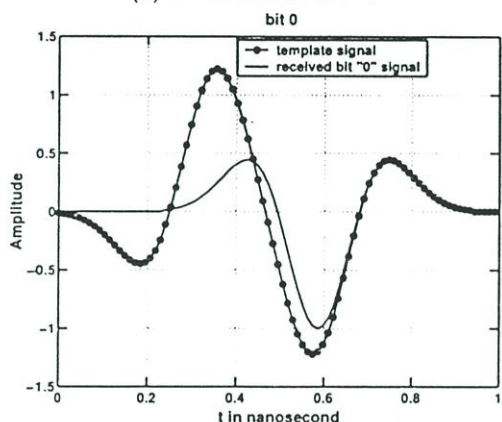
The pulse detections at the receiver for bit "1" and bit "0" are shown in Fig. 3(a) and Fig. 3(b), respectively. All the detection schemes in the simulation employed the correlation between the template signal and the received signal. After the synchronization process, therefore, the correlation of bit "1" with the template signal is positive value. The correlation will be negative value when bit "0" is detected.

## 2.3 Channel Model

The UWB-IR system employed the extremely short pulse duration instead of the continuous wave. Therefore, the general channel model for narrow band system such as Rayleigh fading, can not be used. In the simulation, the two-rays propagation is considered as the multipath channel. So, the direct path and the ground reflection path are the major propagation mode. To consider the effects of the multiple access interference (MAI), the reflected delay is assumed to



(a) Pulse detect bit "1"



(b) Pulse detect bit "0"

Fig. 3: Detection of bi-phase modulation for UWB-IR system by using template signal.

be 5 ns, that equals to one time slot. Hence, the received signal of each users may interfered by the MAI. However, it depended on the hopping sequence of the user.

### 3. SYSTEM MODEL AND SIMULATION PARAMETERS

System model considered in this simulation including the bi-phase modulated UWB, the TH multiple access scheme for the multi-users operation, the multipath channel modelled by the two-rays propagation, and the modified turbo coding for the UWB channel. Fig. 4 shows the system block diagram of the combination of turbo coding and UWB-IR system. Channel encoder encodes the information bit-sequence into one of codeword and passes to pulse mapping. The pulse mapper maps a bit sequence into a train of pulse waveform signals. In this simulation, we employed two waveforms (bi-phase) to transmit the data sequences.

The code rate of turbo code for this simulation is  $R = 1/3$ , numbers of repetition pulses are 3 and 5 (in case of without turbo coding, 7 repetition pulses are used) and we assume the delay time between the LOS signal path and ground reflection path is 5 ns that

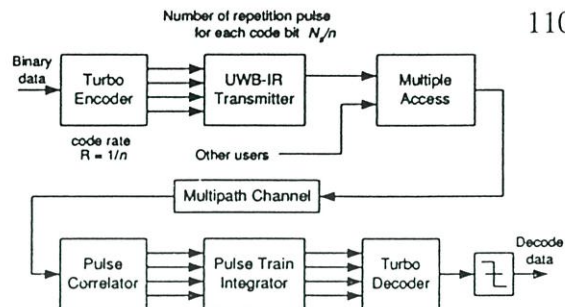


Fig. 4: Block diagram of the turbo coding for UWB-IR system.

Table 1: Simulation parameters.

		Modulation	Bi-phase
UWB-IR	Pulse parameter		0.2877 ns
	Pulse width		$T_w = 0.75$ ns
	Pulse repetition		$N_s = 3, 5, 7$
UWB-IR with Turbo code	Frame duration		50 ns
	Bit rate ( $R_b$ )		2.857, 4, 6.667 Mbps
	Number of user		10
	Multiple access		Time hopping
Turbo Encoder	Code rate		$R = 1/3$
	RSC Polynomial		$g = [7, 5]$
	Interleave		Block interleave
	Interleave size		1024
Turbo Decoder	Decoder algorithm		Log-MAP
	Number of iteration		1~5
Channel	Two-rays model		5 ns delayed

equals to one time slot. Table 1 shows the simulation parameters in our investigation.

### 4. SIMULATION RESULTS

We evaluated the BER performance of the turbo coding for TH UWB-IR systems. All modulation schemes are the BPM UWB with 10 active users in the system. Fig. 5 shows the BER performance versus  $E_b/N_0$  for each cases. In this comparison, the BER performance of the conventional TH UWB-IR system over the multipath channel with the 7 repetition pulses (no coding) is used as the reference. To illustrate the effectiveness of FEC coding for UWB transmission, the repetition pulses are reduced to 3, in the case of combining of the turbo coding with UWB-IR system over two-rays propagation channel. It means that 3 monocycle pulses represents one data symbol. As expected, the BER performance of combining of the turbo coding with the UWB-IR system better performs than that without the turbo coding when  $E_b/N_0$  higher than 2 dB. However, the difference is small when number of the iteration is increased, for example, the performance gap between 3 iterations and 5 iterations is less than 0.1 dB at BER of  $10^{-3}$ . In addition, we can observed that the better BER perfor-

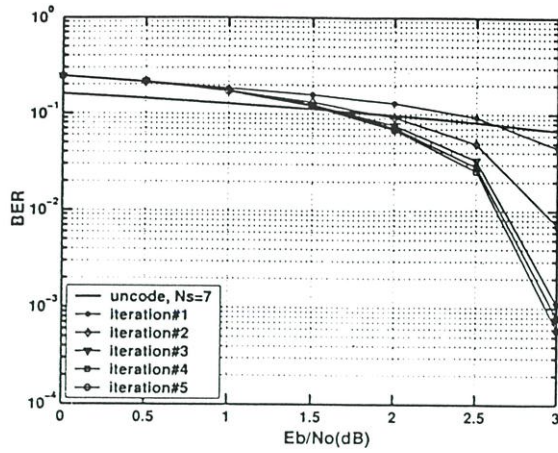


Fig.5: The BER performance versus  $E_b/N_0$  of the turbo coding for time hopping UWB-IR system ( $N_s = 3$ ).

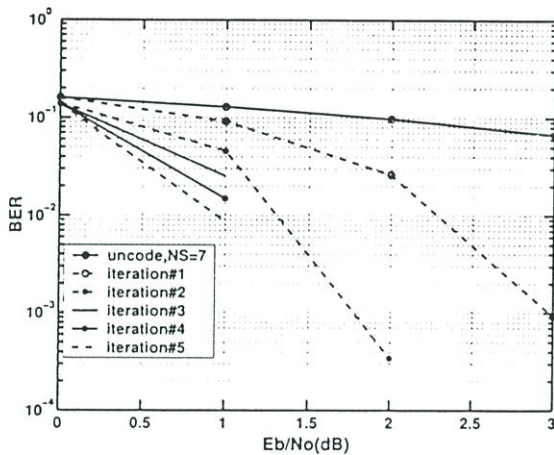


Fig.6: The BER performance versus  $E_b/N_0$  of the turbo coding for time hopping UWB-IR system ( $N_s = 5$ ).

mance can be obtained although the number of repetition pulse is reduced to 3.

Fig. 6 shows the performance of the turbo coding for TH UWB-IR system when the number of the repetition pulse reduced to 5. It is clearly observed that after 3 iterations, the BER became zero when the  $E_b/N_0$  is higher than 1 dB. It is noted that the 5 repetition pulses are used to represent one symbol. Therefore, the achievable data rate is lower than 3 repetition pulses.

## 5. CONCLUSIONS

The BER performance of the turbo coding for the TH UWB-IR system over the multipath propagation is estimated through the simulation. The proposed combination system has some advantages over the conventional transmission scheme such as the number of repetition pulse can be reduced. As the simulation

results, although the number of repetition pulses is reduced to 3 and 5 compared with 7 repetition pulses for the conventional system, but when the turbo code is employed, the better BER performance can be obtained. By using the turbo coding, the detection error caused by multipath propagation and multiple access interferences can be improved. With the advantage of the turbo code, the high speed UWB-IR communication and the range extension for the WPANs can be possible.

## References

- [1] M. Z. Win, R. A. Scholtz, "Ultra-wide bandwidth time hopping multiplex-access communications," *IEEE Trans. Commun.*, pp. 679-691, no. 4, Apr. 2000.
- [2] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo code," in *Proc. IEEE ICC 1993*, pp. 1064-1070, 1993.
- [3] N. Yamamoto and T. Ohtsuki, "Adaptive internally turbo-coded ultra wideband-impulse radio (AITC-UWB-IR) systems," *Proc. IEEE ICC'03*, pp. 3535-3539, May 2003.
- [4] W. C. Chung and D. S. Ha, "On the performance of bi-phase modulation UWB signals in a multipath channel," *Proc. IEEE VTC'03-Spring*, pp. 1656-1658, Apr. 2003.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27  
27<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference

# Volume II

สาขาบทความ

- ระบบควบคุมและการวัดคุม. (GT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

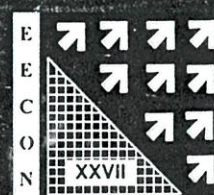
11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น



Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
Tel: +66 2 7372500-47 Ext.5140 Fax +66 2 3264176  
E-mail: {s5061099, kcmoncha, ktprakit}@kmitl.ac.th

**Abstract**

Ultra-wideband (UWB) communications have been considered as the short-range and high speed transmission for the next generation of the wireless personal area networks (IEEE 802.15.3a). In this paper, the BER performance of the bi-phase modulated UWB systems when using the turbo code with time-hopping multiple access is presented. We evaluate the performance of the system based on the measured time dispersion channel. The simulation results showed that the BER performance can be improved by combining the turbo code with the conventional UWB system. Moreover, the number of pulse repetition can also be reduced in order to achieve the high data rate transmission. As the results for  $N_s = 10$ , the 2 dB diversity gain can be obtained for 3 iterations turbo decoding compared with the convolutional code at BER of  $10^{-3}$ .

**Keywords:** ultra-wideband (UWB) communication, turbo coding, time dispersion channel

**1. Introduction**

Ultra-wideband (UWB) radio or impulse radio (IR) has attracted much attention for indoor high data rate communication such as Wireless Personal Area Networks (WPANs) or multimedia communication systems. Unlike narrowband communication, the UWB systems use an ultra-short pulse for transmitting a data signal. Moreover, it enables coexistence with other narrowband systems. The FCC limited the EIRP of -41.3 dBm/MHz for indoor communication [1]. The emission power is restrictively limited under the thermal noise power of other existing systems. Therefore, the UWB system can operate without interference to other radio systems. On the other hand, UWB performance may be degraded by other existing system. To overcome this problem, several techniques such as Rake combiner, forward error correcting code (FEC) and equalization have been proposed to improve BER performance and extend the service area.

Recently, few FEC coding strategy for the UWB-IR communication systems have been proposed [2], [3]. The low-rate convolutional coding has been intro-

duced, which the codeword is mapped into pulse directly [2]. The performance of such system represents the proposed code scheme outperform the uncoded system and the processing complexity of decoder is proportional to logarithm base 2 of the number of pulse repetition. The combination of turbo coding and pulse position modulation (PPM) for UWB-IR system over an additive white Gaussian noise (AWGN) channel is recently proposed [3]. The performance of the such system shows that the number of repetition code can be reduced while provide the better BER. Nevertheless, the performance of bi-phase modulation for the UWB system is better than PPM in several aspects such as the smoother power spectral density and the higher resistance to jitter [4]. However, when UWB pulse is propagated into the rich multipath environment, the signal distortion caused by time dispersion phenomenon shall be considered.

In this paper, the BER performance of the turbo code in combination with bi-phase modulation for the time-hopping UWB-IR systems over the measured UWB channel is investigated. The simulation results showed that the BER performance of the UWB-IR system when using turbo code is better than convolution code, although lower constraint length on the time dispersion channel is employed. Moreover, the number of the pulse repetitions can be decreased while provided the better BER.

**2. System Model**

**2.1 UWB Transmitter**

In UWB system, the binary information are substituted by the ultra-short pulses and one information bit is replaced by  $N_s$  pulses. For the UWB-IR TH-CDMA, the transmitted signal for the  $k$ th user can be expressed as

$$s_{tr}^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} D_{(j/N_s)}^{(k)} \cdot w_{tr}(t - jT_f, -c_j^{(k)}T_c) \quad (1)$$

where  $T_f$  and  $T_c$  are frame and chip duration, respectively.  $\{c_j^{(k)}\}$  is the dedicated pseudo-random sequence of user  $k$ ,  $D_{(j/N_s)}^{(k)}$  is the binary sequence conveying of user  $k$ ,  $j$  is dedicated the frame number and

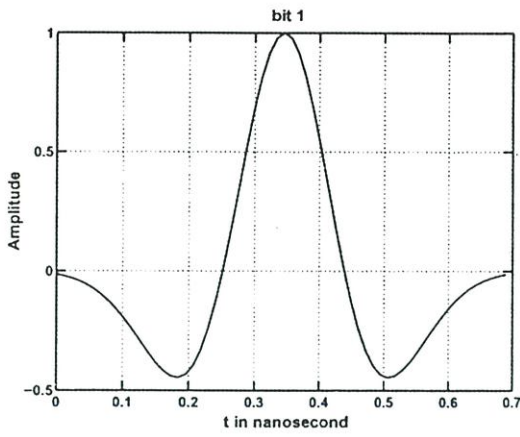


Fig. 1. The UWB pulse waveform with  $\tau_m=0.2887$  ns.

$\omega_{tr}(\cdot)$  is the UWB pulse waveform. In our investigation, the Gaussian doublet pulse is used and is given by

$$\omega_{tr}(t) = [1 - 4\pi(\frac{t}{\tau_m})^2] \exp[-2\pi(\frac{t}{\tau_m})^2]. \quad (2)$$

Fig. 1 represents the UWB pulse waveform with  $\tau_m = 0.2887$  ns.

## 2.2 UWB Receiver

In order to maintain the low cost system the correlation receiver is considered, instead of Rake receiver [6]. The relation between the received signal and the template signal is found based on the principle of this receiver. In decision making process, the  $N_s$  repetition pulses are used for decision the received bit. We can assume the received signal is bit "0" is follow to the condition,  $D_0^{(1)}$  as  $D_0^1 = 0$

$$\Leftrightarrow \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau_1+jT_f}^{\tau_1+(j+1)T_f} r(t)v(t-\tau_1-jT_j-c_j^{(1)}T_c)dt < 0, \quad (3)$$

where  $\Leftrightarrow$  represents the condition "if and only if,"  $r(t)$  is the received signal and  $v(t)$  is the template signal. If the summation provided the positive value, then  $D_0^1$  as bit "1" is detected. In this paper, represented waveform of bit "1" is used as the template signal.

## 2.3 UWB Channel

The UWB systems employ the ultra-short pulse to represent data signal instead of the continuous wave. Therefore, the general channel model for narrowband systems can not be applied. When UWB pulse propagates through the wireless channel, the signal is influenced by propagation mechanism, leads to the pulse distortion.

The characterization of the radio channel can be express in terms of its time-variant complex impulse

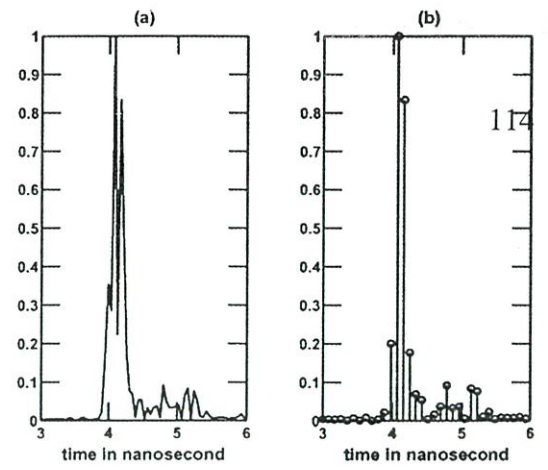


Fig. 2. The UWB channel response, (a) the measured impulse response, (b) the discrete representation of the channel.

response,  $h(t, \tau)$ , where  $t$  and  $\tau$  denote the measurement time and delay, respectively

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) \delta[t - \tau_l(t)], \quad (4)$$

where  $\alpha_l$  is the complex amplitude of an arrived signal by propagation path  $l$  with delay  $\tau_l$ .

In order to investigate the performance of the proposed system in realistic environment, the measured wireless channel is needed. Fig. 2 shows the measurement of  $h(t, \tau)$  in the indoor environment over the frequency bandwidth of 3 GHz to 11 GHz [5]. The experiment T-R separation distance is 1 m. As the results, the time dispersion phenomenon of the channel can be observed. Therefore, the received signal at the receiver can be characterized by the convolution of the pulse waveform,  $\omega_{tr}(t)$ , and the time dispersion

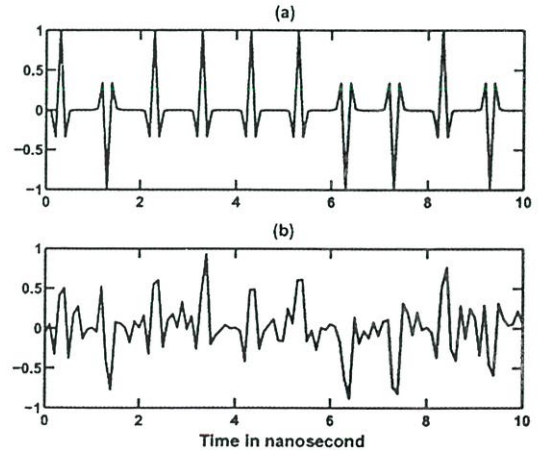


Fig. 3. Received signal when transmitted through the UWB channel, (a) transmitted signals, (b) received signals.

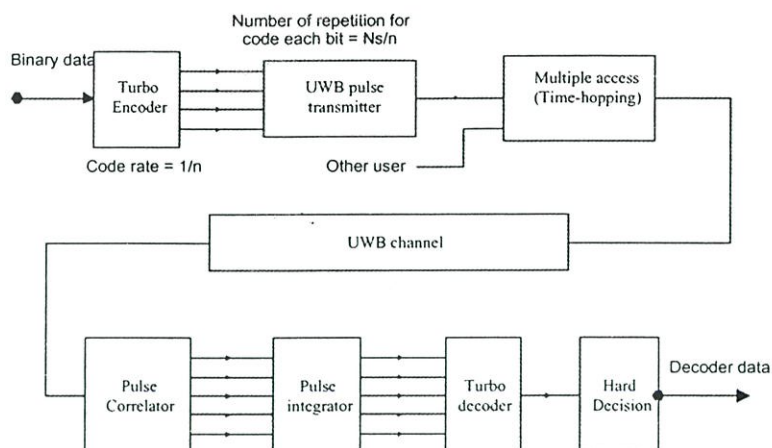


Fig. 4. Block diagram of the turbo coding for UWB-IR system.

$h(t, \tau)$ , and is given by

$$r(t) = h(t, \tau) * \omega_{tr}(t) + n(t), \quad (5)$$

where  $*$  denotes the convolution operation and  $n(t)$  is the additive white Gaussian noise with zero mean and variance  $\sigma^2$ .

Fig. 3 shows the received signal at the receiver when UWB pulse propagates through the time dispersion channel.

### 3. UWB System with Turbo Code

The block diagram of the UWB-IR system with turbo coding is shown in Fig. 4. The data bit  $d_i$  is encoded by the turbo encoder with the code rate of  $R = 1/n$ , where  $n$  is the code word length. The output of this process is passed to the UWB transmitter. In this process, the code word is changed into UWB pulses, then transmitted to time hopping multiple access before passed to the time dispersion channel. The receiver of UWB system consists of the pulse correlator, pulse integrator, turbo decoder and a part of hard decision process. Table 1 shows the simulation parameters used for our investigation. In this paper, the bi-phase modulation technique for modulated data signals is used. The time-hopping multiple access, frame duration  $T_f$  of 5 ns, the bit rate is  $R_b$  of  $1/N_s T_f$  and the active users of 5 are employed in this systems. For turbo coding, a generator matrix ( $g$ ) = [7,5], the block interleave and the interleave size of 1024 are used. The soft-input soft-output algorithm used in this systems is the Log-MAP algorithm. In the UWB-IR with convolution code, the RSC polynomial is  $g = [15,17]$  and the decoder algorithm is Viterbi algorithm.

### 4. Simulation Results

The bit error rate performance of UWB-IR systems in time dispersion channel by using computer

Table 1. Simulation parameters.

UWB-IR System	
Modulation	Bi-phase
Pulse parameter	0.2877 ns
Pulse width	$T_w=0.75$ ns
Pulse repetition	$N_s=5, 10$
Frame duration	5 ns
Bit rate ( $R_b$ )	20.40 Mbps
Number of user	5
Multiple access	Time-hopping

Turbo Encoder and Decoder	
Code rate	$R = 1/3$
RSC polynomial	$g = [7, 5]$
Interleave	Block interleave
Interleave size	1024
Decoder algorithm	Log-MAP
Number of iteration	1-5

Convolution Code	
RSC polynomial	$g = [15, 17]$
Code rate	$R = 1/2$
Decoder algorithm	Viterbi

simulation is evaluated. Fig.5 shows the BER performance of UWB-IR systems in which the number of pulse repetitions of 5 is used. The performance of the UWB-IR systems with the turbo code attains the best performance compared with those with convolution code and without code, although the constant length of turbo coding is less than that of convolution coding. In this paper, the BER performance of  $10^{-3}$  is considered. The BER performance of turbo coding systems is improved in every iteration decoding and becomes zeros at 4 to 5 iterations when  $E_b/N_0$  is higher than 4 dB.

Fig.6 shows the BER performance of UWB-IR systems when the number of pulse repetition code of 10 is used. In this simulation, we can confirm that the BER performance of UWB-IR systems can be improved when the turbo code is used. The turbo coding system compared with convolution code systems

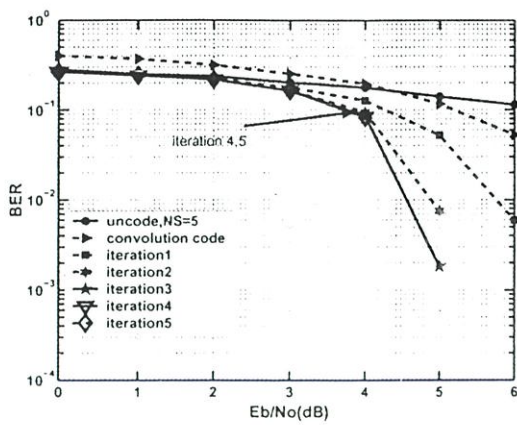


Fig. 5. The BER performance versus  $E_b/N_0$  of turbo coding for time-hopping UWB-IR system ( $N_s = 5$ ).

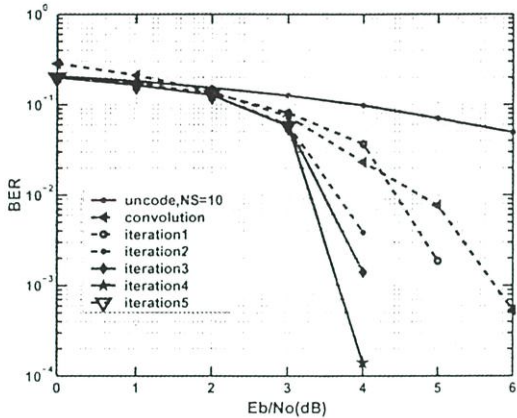


Fig. 6. The BER performance versus  $E_b/N_0$  of turbo coding for time-hopping UWB-IR system ( $N_s = 10$ ).

at 1 iteration has the diversity gain equal to 0.5 dB and 2 dB at the 3rd iteration, respectively, when the BER of  $10^{-3}$  is considered.

### 5. Conclusions

We proposed to use the turbo coding in time-hopping UWB systems when the data signals is transmitted to the time dispersion channel. From the computer simulation, it is found that the BER performance of UWB systems is improved by using turbo coding. Moreover, this system is better than the systems in which the convolution code or uncode are used, when the number of pulse repetition is same. If the number of pulse repetitions is changed from 5 to 10, then diversity gain is equal to 1 dB at 3 iteration. In this paper, the BER of  $10^{-3}$  is considered. According the results, the UWB systems with the turbo code is possible to extend the range of the UWB service area.

### 6. Future Works

The performance of UWB communication systems which employ equalization, RAKE combined and error correcting code will be compared. The performance of UWB communication systems in DS-SS-CDMA which use the turbo coding is considered.

### References

- [1] Federal Communications Commission, "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems," First Report, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [2] A. R. Forouzan, M. Nahiri-kenari and J. A. Saleh, "Low-rate convolutionally encoded time-hopping spread spectrum multiple access systems," *Proc. IEEE PIMRC'00*, vol. 2, pp. 1555-1558, Sep. 2000.
- [3] N. Yamamoto and T. Ohtsuki, "Adaptive internally turbo-coded ultra wideband-impulse radio (AITC-UWB-IR) systems," *Proc. IEEE ICC'03*, pp. 3535-3539, May 2003.
- [4] W. C. Chung and D. S. Ha, "On the performance of bi-phase modulation UWB signals in a multipath channel," *Proc. IEEE VTC'03-Spring*, pp. 1656-1658, Apr. 2003.
- [5] A. Pradubphon, S. Promwong, M. Chamchoy, P. Supanakoon and J. Takada, "Characterization of body shadowing effects on ultra-wideband propagation channel," *Proc. ICCAS'04*, pp. 219-222, Aug. 2004.
- [6] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio: How it work," *IEEE Communication Letter*, vol. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.



**Ponlapat Rerkwande** received the B. E. degree (Electronics and Telecommunication) from King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, in 2002. He is currently pursuing the M. E. degree in Department of Information Engineering, Faculty of Engineering at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). His research areas about error correcting code, information theory, wireless communication and ultra-wideband communication.



**Monchai Chamchoy** received the B. E. (with honors) degree in Electronics Technology and M. E. degree in Electrical Engineering both from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 1996 and 2000, respectively.

Since 1997, he was a Faculty Member at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His main research interests are

channel modeling, MIMO transmission, and UWB communication.

**Prakit Tangtisanon**, photograph and biography not available at time of publication.

## ประวัติผู้เขียน

นาย พลพัทธ์ ฤกษ์วันดี เกิดเมื่อวันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ฯ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา (วิทย์-คณิต) จากโรงเรียนบางกะปิ จังหวัดกรุงเทพ เมื่อปีการศึกษา 2540