

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบการสื่อสารแบบ IDMA สำหรับการสื่อสารยุคที่ 4

Chip Interleaved DS-CDMA Frequency Domain Receiver

โดย
นางสาวมณีรัตน์ โตจิราการ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72663
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ย. 2550

b..... 11271023
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chip Interleaved DS-CDMA Frequency Domain Receiver



BY

MISS MANEERAT TOJIRAKARN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	ระบบเครื่องรับสัญญาณเชิงความถี่แบบ IDMA
นักศึกษา	นางสาวมณีรัตน์ ไชจิรากร รหัสนักศึกษา 46010595
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.จักรี ทัฬหาคย์วิศิษฐ์
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2549

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบเครื่องรับสัญญาณเชิงความถี่แบบ IDMA	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมณีนันท์ ไตจิราการ	รหัสประจำตัว 460105๖5
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.จักรี ทัพภาคย์วิศิษฐ์	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ	
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
ปีการศึกษา	2549	

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการออกแบบเครื่องรับสัญญาณแบบ chip interleaved DS-CDMA โดยใช้การรวมกันระหว่างเทคนิคของInterleavingและ DS-CDMA เพื่อที่จะกำจัดerrorของข้อมูลที่เกิดจากการรบกวนจากเสาอากาศข้างเคียง(CCI) และการรบกวนที่เกิดจากการเข้าถึงหลายทาง(MAI) โครงการนี้ใช้กลุ่มของตัว Interleaverเพื่อแยกแต่ละ User ยิ่งไปกว่านั้น ผู้ใช้งานระบบทุกคนจะใช้Signature Sequenceที่เหมือนกันเพื่อที่จะรักษาข้อได้เปรียบของระบบการสื่อสารแบบCDMAไว้ ซึ่งจากผลการจำลองทดลองระบบแสดงให้เห็นว่า โครงการนี้สามารถกำจัด CCI และ MAI

Thesis Title Chip Interleaved DS-CDMA Frequency Domain Receiver
Student Miss Maneerat Tojirakam ID. 46010595
Advisor Dr. Chakree Teekapakvisit
Graduate Level Bachelor Degree of Information Engineering
Department Information Engineering
Academic Year 2006

ABSTRACT

This project introduces to a designed technique of chip interleaved DS-CDMA Receiver, using a joint Interleaving technique and DS-CDMA, to eliminate an error caused by an interference from adjacent antenna (CCI) and Multiple access interference (MAI). This project utilizes a set of interleavers to distinguish a particular user. Moreover, all users are employed the same signature sequence to keep an advantage of CDMA concepted. The performance from the simulation results show that the system can remove the CCI and MAI

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.จักรี ทิมภาคย์วิศิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยแนะนำให้คำปรึกษาและข้อมูลต่างๆ ในการทำโครงการนี้ และคอยให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มกำลังเสมอมา ขอบพระคุณคุณแม่ที่คอยเป็นห่วงให้กำลังใจตลอดช่วงเวลาการทำงาน ขอบคุณเพื่อนๆ ที่มีน้ำใจคอยช่วยเหลือทุกอย่างตลอดการทำโครงการ

นางสาวณัฏฐ์รัตน์ โตจิรากร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	3
บทที่ 2 พื้นฐานระบบการสื่อสาร	4
2.1 ความเป็นมาของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์	4
2.2 พัฒนาการของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์	4
2.3 พื้นฐานของระบบ CDMA	5
2.4 ประวัติความเป็นมาของระบบ CDMA	6
2.5 การแยกสัญญาณของระบบ CDMA	7
2.6 โครงสร้างของระบบ CDMA	8
2.7 ข้อดีของระบบ CDMA	10
2.8 ข้อดีของ CDMA Technology	10
2.9 ปัญหาของระบบ CDMA	11
2.9.1 Near-far problem	11
2.9.2 Intersymbol Interference(ISI)	12
2.9.3 Fading Problem	13
2.10 Interleaver	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.11 Convolutional Code	23
2.12 อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (MAP Decoding Algorithm)	29
2.13 Forward error correction (FEC)	33
2.14 Burst Error	38
2.15 Equalization	39
2.16 Adaptive Filtering	44
2.17 Least mean square algorithm(LMS)	49
2.18 Diversity technique	50
2.19 ความแตกต่างของระบบ CDMA และ IDMA	51
2.20 ข้อดีของระบบ IDMA	51
บทที่ 3 โครงสร้างของระบบ IDMA	
3.1 โครงสร้างของระบบ IDMA	53
3.1.1 Transmitter Structure	54
3.1.2 Iterative chip by chip receiver	55
3.2 The ESE function	59
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองแบบSIMO(SNR=36 dB)	61
4.2 ผลการทดลองแบบSIMO(SNR=50 dB)	63
4.3 ผลการทดลองแบบMIMO	64
บทที่ 5 สรุป	
5.1 สรุปผลการทดลองรูปที่ 4.1	66
5.2 สรุปผลการทดลองรูปที่4.2	66
5.3สรุปผลการทดลองรูปที่ 4.3	67

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงประมาณการก้าวหน้าของระบบ CDMA	7
รูปที่ 2.2 CDMA ภาพจาก Qualcomm Presentation “Basic of CDMA”	7
รูปที่ 2.3 Conventional CDMA transmitter and iterative MUD receiver.	9
รูปที่ 2.4 ภาพจำลองการเกิดปัญหา Near-Far Problem	11
รูปที่ 2.5 แบบจำลองคลื่นที่เกิด Fading จากการส่งแบบ Multipath	12
รูปที่ 2.6 กราฟที่แสดงถึง Fading problem รูปแบบต่างๆ	13
รูปที่ 2.7 รูปกราฟ Power Density Function ของระดับสัญญาณที่ได้รับ	14
รูปที่ 2.8 The pdf of the envelope variation	15
รูปที่ 2.9 The pdf of the envelope variation	16
รูปที่ 2.10 การ Interleave ข้อมูล (a) Block Interleave , (b) Random Interleave	18
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างวิธีการ Puncturing	19
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างวิธีการ Depuncture	19
รูปที่ 2.13 block diagram ของ Interleaver	21
รูปที่ 2.14 การสร้างดิจิทัลคอนโวลูชันจาก shift register	24
รูปที่ 2.15 การสร้างรหัสคอนโวลูชันในตัวอย่าง	25
รูปที่ 2.16 แผนภาพต้นไม้สำหรับรหัสคอนโวลูชันในปัญหาตัวอย่าง	26
รูปที่ 2.17 Trellis ในปัญหาตัวอย่าง	27
รูปที่ 2.18 State diagram ในปัญหาตัวอย่าง	27
รูปที่ 2.19 Viterbi algorithm สำหรับรหัสคอนโวลูชันในปัญหาตัวอย่าง	28
รูปที่ 2.20 วงจรเข้ารหัส Convolution ที่ค่า R เท่ากับ 1/2 และค่า K เท่ากับ 9	29
รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการวนลูปไปข้างหน้าและไปข้างหลัง	32
รูปที่ 2.22 รูปตัวอย่างการเข้ารหัสแบบ FEC = 1/2 และ FEC = 7/8 ที่ภาคส่ง	35
รูปที่ 2.23 รูปตัวอย่างการถอดรหัสแบบ FEC = 1/2 ที่ภาครับสัญญาณ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.24 รูปตัวอย่างการถอดรหัสแบบ FEC = 7/8 ที่ภาครับสัญญาณ	36
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการเกิด Burst Error	39
รูปที่ 2.26 Block diagram ของระบบการสื่อสารอย่างง่าย โดยใช้ Adaptive equalizer ที่ฝั่งภาครับ	40
รูปที่ 2.27 ตัวอย่าง Equalizer แบบ FIR(Finite Impulse Response) ซึ่งเป็น Linear Equalizer(Transversal Filter) ที่เป็นแบบ Feed Forward tap	41
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างของรูปกราฟสัญญาณ (a)สัญญาณที่ต้องการส่ง (b) ช่องสัญญาณ ในเชิงเวลา	41
รูปที่ 2.29 ตัวอย่างของรูปกราฟสัญญาณ(a)สัญญาณที่ต้องการส่ง (b) ช่องสัญญาณในเชิงความถี่	42
รูปที่ 2.30 รูปกราฟของสัญญาณที่ได้รับโดยไม่ได้ผ่านตัว equalizer	42
รูปที่ 2.31(a)กราฟสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณและ (b) อินเวอร์สของค่าสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ	43
รูปที่ 2.32 (a) กราฟสัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณในโดเมนเวลา (b) ผลลัพธ์เมื่อนำสัญญาณในรูปที่ 2.30 มา convolution กับสัญญาณในรูปที่ 2.32 (a)	44
รูปที่ 2.33 General form of Adaptive Filter	45
รูปที่ 2.34 Adaptive filter for Noise cancellation	45
รูปที่ 2.35 Adaptive filter for Noise cancellation	46
รูปที่ 2.36 แสดง error performance surface ของ J(n)	47
รูปที่ 2.37 (a) Unknown dynamical system (b) Signal-flow graph of adaptive model for the system	48
รูปที่ 2.38 Block diagram ของระบบ CDMA และ IDMA ตามลำดับ	51
รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งและภาครับของระบบสื่อสาร IDMA โดยที่ (π^k) เป็นตัว Interleaver สำหรับ user-k	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบ IDMA ทางภาคส่ง	54
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบ IDMA ทางภาครับที่เป็นแบบ Iterative โดยมี การเชื่อมต่อ กันระหว่าง Channel Estimation และ Multi-user Detection	55
รูปที่ 4.1 รูปกราฟผลของสัญญาณทางฝั่งภาครับ โดยมีจำนวน Iteration เท่ากับ 10 ครั้ง	61
รูปที่ 4.2 รูปกราฟผลสัญญาณทางภาครับที่มีการทำ Iterative จำนวน 10 ครั้ง โดย มีค่า SNR เป็น 50 dB	63
รูปที่ 4.3 เป็นรูปกราฟสัญญาณทางฝั่งภาครับ ที่มี Iterative จำนวน 20 ครั้ง โดย ที่เป็นระบบ MIMO	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

โลกในยุคโลกาภิวัตน์ได้หมุนไปอย่างรวดเร็ว การติดต่อสื่อสารที่รวดเร็ว ถูกต้อง มีความผิดพลาดน้อยที่สุด และไร้ขีดจำกัดในการส่งข้อมูลได้ทุกรูปแบบและรวดเร็วทั้งยังถูกต้องที่สุด เป็นสิ่งที่จำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์ในยุคนี้ไปแล้ว ดังนั้น จึงมีผู้ผลิต ค้นคว้า วิจัย เพื่อหาเทคโนโลยีที่สามารถนำมาตอบสนองความต้องการในด้านการสื่อสารได้ดีที่สุด ซึ่งก็ได้มีการพัฒนา มาตั้งแต่การสื่อสารแบบส่งข้อมูลผ่านสายอากาศ จนสามารถสื่อสารข้อมูลเสียงแบบไร้สาย และในปัจจุบันสามารถสื่อสารข้อมูลที่เป็น ภาพ เสียง ข้อความ ภาพเคลื่อนไหว บนสื่อไร้สายที่มีความเร็วสูงได้แล้ว ซึ่งนั่นก็คือระบบ CDMA

ปัจจุบัน ระบบCDMA ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารยุค 2G และ ยุค 3G CDMA ใช้วิธีให้ทุกคนใช้ความถี่เดียวกันพร้อมๆ กัน เช่นเดียวกับ สถานีวิทยุที่ออกอากาศ ในความถี่เดียวกัน ในเวลาและสถานที่เดียวกัน

CDMA เป็นเทคโนโลยีแบบที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบหนึ่ง ซึ่งข้อมูลที่ส่งออกมาจาก สถานีฐานจะประกอบด้วยข้อมูลของผู้ใช้หลายคน ในระบบ CDMA นี้ผู้ใช้แต่ละคนจะ ได้รับcode ชุดหนึ่งที่ไม่เหมือนกับ code ของผู้ใช้คนอื่น เมื่อใช้ code ดังกล่าวถอดรหัสสัญญาณจากสถานี ฐาน ทำให้ผู้ใช้แต่ละคนได้รับข้อมูลในส่วนของตัวเองได้

ระบบ CDMA มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น การแบ่งการใช้ช่องสัญญาณ การลด ปัญหาการแทรกสอดข้ามเซลล์กัน มีการป้องกันการ Fading ที่ดี เป็นต้น

แต่ข้อเสียของระบบ CDMA ก็คือ เมื่อผู้ส่งสามารถใช้สื่อในการส่งข้อมูลร่วมกันได้ ดังนั้น สัญญาณที่มาจาก user ที่ต่างกันก็อาจซ้อนทับกัน ทำให้เกิดปัญหา Multiple Access Interference (MAI) ดังนั้นที่ฝั่งภาครับจึงต้องมีเทคนิคที่ใช้ในการแยกสัญญาณที่ส่งมาแบบรวมกัน ซึ่งก็คือ Multi-user Detection(MUD) แต่ก็ยังคงเป็นปัญหาสำหรับระบบ CDMA และเมื่อจำนวนผู้ใช้ระบบ เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากแล้วค่าความซับซ้อนของอัลกอริทึมใน Multi-user Detection ก็จะเพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็ว อีกทั้ง การวิเคราะห์multi-user Detection ในระบบCDMA ก็จะมีค่าความซับซ้อนด้วย เนื่องจากความสัมพันธ์กันของระบบจำลองระหว่างsignature sequence ในระบบ random waveform system

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อลดความซับซ้อนของตัว Multi-user Detection (MUD) ในระบบ CDMA ลง จึงมีผู้เสนอระบบ IDMA ขึ้นมา เพื่อนำมาใช้ในการลดปัญหาความซับซ้อนทางภาครับของระบบ CDMA โดยมีเหตุผลที่ใช้ระบบ IDMA ก็เนื่องมาจากว่า ระบบ IDMA นอกจากจะสามารถแก้ปัญหาในด้านความซับซ้อนทางฝั่งภาครับโดยที่ในระบบมีผู้ใช้อยู่เป็นจำนวนมากแล้ว ระบบ IDMA ยังสามารถคงคุณสมบัติข้อดี ข้อได้เปรียบต่างๆของระบบ CDMA ไว้ด้วย
- เพื่อตอบสนองเป้าหมายของการสื่อสารในยุค 4th generation ที่มีข้อกำหนดในเรื่องต่างๆ ดังนี้
 1. Quality of service(Qos) : packet-based service (อาจจะเป็น IPv6) จะต้องมียุทธศาสตร์ มีค่า delay ต่ำ โดยที่ผลลัพธ์จะต้องเป็น block ขนาดสั้นๆ กระแสข้อมูลแบบขนาน ที่มี Qos ใน classes อื่นจะต้องได้รับการสนับสนุนให้ใช้ได้กับ hierarchical source coding, video steaming และ parallel support ของ application อื่นๆ
 2. System Scalability : ขนาดของระบบควรจะแปรผันตามกับอัตราการรับ-ส่งข้อมูล (โดยจะต้องสามารถมีอัตราส่งข้อมูลได้สูงถึง 100 Mbps ในการสื่อสารที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และจะต้องมีอัตราส่งข้อมูลได้สูงถึง 1 Gbps ในการสื่อสารที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ หรืออยู่กับที่) Bandwidth(ประมาณ 20-100 MHz ใน 5 MHz slots) และขนาดของเซลล์(ทั้งพิโค, ไมโคร และมาโครเซลล์)
 3. High Efficiency : ทั้ง Bandwidth Efficiency(ประมาณ 4-10 bits/s/Hz) และ simultaneously high power efficiency
 4. เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง(High-speed mobility), High velocities และ fast adaptation
 5. มีความซับซ้อนในการประมวลผลที่น้อย (Iterative processing)
 6. ใช้เทคนิคการส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพและ cross-layer design รวมถึงเทคนิคอื่นๆ ที่เหมาะสมเพื่อทำให้ได้เป้าหมายตามข้อข้างต้น

1.3 ขอบเขตโครงการ

ขอบเขตของโครงการในภาคเรียนที่ 1 คือ ออกแบบระบบ IDMA ที่เป็นระบบ Downlink โดยใช้เสาอากาศฝั่งส่ง 1 เสาอากาศ และใช้เสาอากาศฝั่งรับ 1 เสาอากาศ ส่วนในภาคเรียนที่ 2 จะเป็นระบบ Downlink ที่เป็นเสาอากาศฝั่งส่งหลายเสา และเสาอากาศฝั่งรับหลายเสาด้วย

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบCDMA การทำงานของระบบCDMA คุณสมบัติข้อดี ข้อได้เปรียบเทียบต่างของระบบ CDMA หาข้อเสีย จุดอ่อน ปัญหาที่เกิดในระบบCDMA ที่มาของปัญหาในระบบCDMA
2. ศึกษาโครงสร้างของระบบIDMA ความแตกต่างของระบบIDMA กับ ระบบCDMA เปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบ CDMA และระบบ IDMA ความสามารถในการนำระบบIDMA มาแก้ปัญหาคู่อ่อนที่เกิดขึ้นในระบบ CDMA
3. เขียนโปรแกรมจำลองวิธีการทำงานของระบบIDMA
4. นำโปรแกรมที่เขียนเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทดลองประมวลผลของสัญญาณที่เกิดขึ้น
5. นำผลการทดลองที่ได้มาบันทึกผลเป็นรูปภาพ เพื่อดูคุณภาพของสัญญาณที่ได้จากระบบจำลอง
6. ศึกษาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นแล้วนำไปแก้ไข เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เรื่อง พื้นฐานระบบการสื่อสาร

2.1 ความเป็นมาของโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

อเล็กซานเดอร์ เกรแฮม เบล เป็นผู้วางรากฐานระบบโทรศัพท์ไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2419 หรือประมาณร้อยปีเศษแล้ว โทรศัพท์มีพัฒนาการค่อนข้างช้า เริ่มจากการสวิตช์ด้วยคน มาเป็นการใช้ระบบสวิตช์แบบอัตโนมัติด้วยกลไกทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำพวกรีเลย์ จนในที่สุดเป็นระบบทรานซิสเตอร์ ครั้งเข้าสู่ยุคดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ระบบโทรศัพท์ที่ใช้ได้เปลี่ยนแปลงวิธีการสวิตช์มาเป็นแบบดิจิทัล มีการแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นดิจิทัล โดยแถบเสียงขนาด 4 กิโลเฮิรตซ์ต่อวินาที ใช้อัตราสุ่ม 8,000 ครั้งต่อวินาที ได้สัญญาณดิจิทัลขนาด 64 กิโลบิตต่อวินาที แถบเสียงแบบดิจิทัลจึงเป็นข้อมูลที่มีการรับส่งกันมากที่สุดในโลกอยู่ขณะนี้ จนประมาณปี 1983 ระบบเซลลูลาร์เริ่มพัฒนาขึ้นใช้งาน ระบบแรกที่พัฒนามาใช้งานเรียกว่า ระบบ AMPS (Analog Advance Mobile Phone Service) ระบบดังกล่าวส่งสัญญาณไร้สายแบบอะนาล็อก โดยใช้คลื่นความถี่ที่ 824-894 เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้หลักการแบ่งช่องทางความถี่หรือที่เรียกว่า FDMA - Frequency Division Multiple Access ต่อมาประมาณปี 1990 กลุ่มผู้พัฒนาระบบเซลลูลาร์ได้พัฒนามาตรฐานใหม่โดยให้ชื่อว่า ระบบ GSM-Global System for Mobile Communication โดยเน้นระบบเชื่อมโยงติดต่อกันได้ทั่วโลก ระบบดังกล่าวนี้ใช้วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยระบบ TDMA-Time Division Multiple Access โดยใช้ความถี่ในการติดต่อกับสถานีเบสที่ 890-960 เมกะเฮิรตซ์

สำหรับในสหรัฐอเมริกาเองก็มีการพัฒนาระบบของตนขึ้นมาใช้ในปี 1991 โดยให้ชื่อว่า IS - 54 - Interim Standard - 54 ระบบดังกล่าวใช้วิธีการเข้าสู่ช่องสัญญาณด้วยระบบ TDMA เช่นกัน แต่ในช่วงความถี่ 824-894 เมกะเฮิรตซ์ และในปี 1993 ก็ได้พัฒนาต่อเป็นระบบ IS-95 โดยใช้ระบบ CDMA ที่มีช่องความถี่มากขึ้นคือ 824-894 และ 1,850-1,980 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ร่วมกับระบบ AMPS เดิมได้

2.2 พัฒนาการของระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์

พัฒนาการของโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์แบ่งออกเป็นยุคตามรูปของการพัฒนาเทคโนโลยีได้ดังนี้ **ยุค 1G** เป็นยุคแรกของการพัฒนาระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ การรับส่งสัญญาณใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณอะนาล็อกเข้าสู่ช่องสื่อสารโดยใช้การแบ่งความถี่ออกมาเป็นช่องเล็ก ๆ ด้วยวิธีการนี้มีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนช่องสัญญาณ และการใช้ไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงคิดขัดเรื่องการขยายจำนวนเลขหมาย และการขยายแถบความถี่ ประจวบกับระบบเครื่องรับส่งสัญญาณวิทยุกำหนดขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซล และความแรงของสัญญาณเพื่อให้เข้าถึงสถานีเบสได้ ตัวเครื่องโทรศัพท์เซลลูลาร์ยังมีขนาดใหญ่ ใช้กำลังงานไฟฟ้ามาก ในภายหลังจึงเปลี่ยนมาเป็นระบบดิจิทัล และการเข้าช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ 1G จึงใช้เฉพาะในยุคแรกเท่านั้น

ยุค 2G เป็นยุคที่พัฒนาต่อมาโดยการเข้ารหัสสัญญาณเสียง โดยบีบอัดสัญญาณเสียงในรูปแบบดิจิทัล ให้มีขนาดจำนวนข้อมูลน้อยลงเหลือเพียงประมาณ 9 กิโลบิตต่อวินาที ต่อช่องสัญญาณ การติดต่อจากสถานีลูก หรือตัวโทรศัพท์เคลื่อนที่กับสถานีเบส ใช้วิธีการสองแบบคือ TDMA คือการแบ่งช่องเวลาออกเป็นช่องเล็ก ๆ และแบ่งกันใช้ ทำให้ใช้ช่องสัญญาณความถี่วิทยุได้เพิ่มขึ้นจากเดิมอีกมาก กับอีกแบบหนึ่งเป็นการแบ่งการเข้าถึงตามการเข้ารหัส และการถอดรหัสโดยใส่แอดเดรสเหมือน IP เราเรียกวิธีการนี้ว่า CDMA - Code Division Multiple Access ในยุค 2G จึงเป็นการรับส่งสัญญาณโทรศัพท์แบบดิจิทัลหมดแล้ว

ยุค 3G เป็นยุคแห่งอนาคตอันใกล้ โดยสร้างระบบใหม่ให้รองรับระบบเก่าได้ และเรียกว่า Universal Mobile Telecommunication Systems (UMTS) โดยมุ่งหวังว่า การเข้าถึงเครือข่ายแบบไร้สาย สามารถกระทำได้ด้วยอุปกรณ์หลากหลาย เช่น จากคอมพิวเตอร์ จากเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ระบบยังคงใช้การเข้าช่องสัญญาณเป็นแบบ CDMA ซึ่งสามารถบรรจุช่องสัญญาณเสียงได้มากกว่า แต่ใช้แบบแถบกว้าง (wideband) ในระบบนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า WCDMA

2.3 พื้นฐานของระบบCDMA

CDMA (Code Division Multiple Access) หรือที่นิยมเรียกกันว่า IS-95 ซึ่งมีชื่ออย่างเป็นทางการคือ TIA/EIA-95B บริษัท Qualcomm จาก Sandiango, California USA เป็นผู้พัฒนาระบบ CDMA โดยใช้ Spread Spectrum Technique วิธีการ Spread Spectrum คือ ไม่ได้ให้ช่องสัญญาณหรือ แบ่งเป็น Timeslot เช่นระบบ TDMA แต่ CDMA ใช้วิธีให้ทุกคนใช้ความถี่เดียวกันพร้อมๆ กัน เช่นเดียวกับ สถานีวิทยุที่ออกอากาศ ในความถี่ เดียวกัน ในเวลาและสถานที่เดียวกัน CDMA คือ วิธีการ Multiple Access ซึ่งแตกต่างจาก FDMA ตรงที่ใช้เพียงแถบความถี่เดียว และต่างจาก TDMA ตรงที่ ทุกๆ สถานีสามารถส่งข้อมูลได้พร้อมๆ กัน CDMA พัฒนามาบนพื้นฐานของทฤษฎีการเข้ารหัส โดยที่แต่ละสถานีจะได้รับการมอบหมาย (Assign) รหัส เฉพาะในรูปแบบของอนุกรมตัวเลข เรียกว่า "Chips" ดังตัวอย่าง



สำหรับขั้นตอนการส่งข้อมูล แต่ละสถานีจะต้องทำตามกฎการเข้ารหัสดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data bit 0 \longrightarrow **-1** **Data bit 1** \longrightarrow **+1** **Silence** \longrightarrow **0**

CDMA เป็นเทคโนโลยีแบบที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบหนึ่ง ซึ่งข้อมูลที่ส่งออกมาจากสถานีฐานจะประกอบด้วยข้อมูลของผู้ใช้หลายคน ในระบบ CDMA นี้ผู้ใช้แต่ละคนจะได้รับ code ชุดหนึ่งที่ไม่เหมือนกับ code ของผู้ใช้คนอื่น เมื่อใช้ code ดังกล่าวถอดรหัสสัญญาณจากสถานีฐานทำให้ผู้ใช้แต่ละคนได้รับข้อมูลในส่วนของตัวเองได้

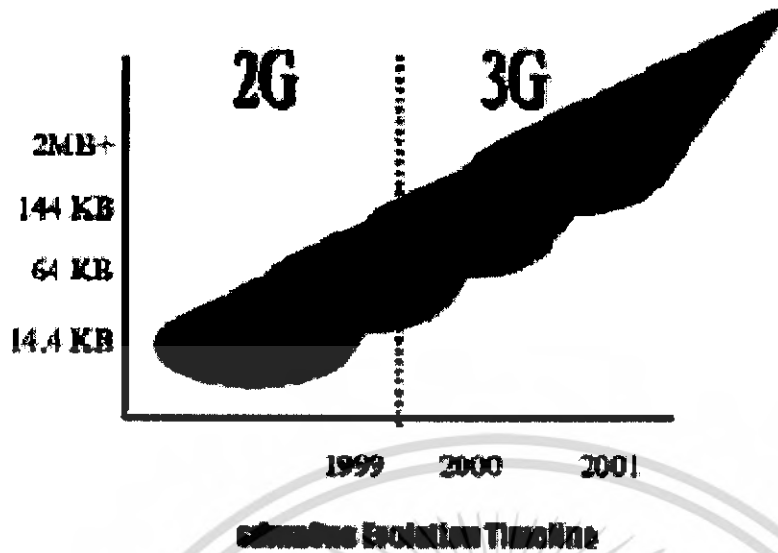
2.4 ประวัติความเป็นมาของระบบ CDMA

CDMA เป็นมาตรฐานของ mobile และ base station สำหรับ dual-mode wideband spread spectrum มาตรฐานนี้นำมาใช้งานในประเทศอเมริกากับ 800 MHz cellular bands ต่อมาดัดแปลงมาใช้กับ Personal communications service (PCS) 1900 MHz มาตรฐานนี้เสนอโดยบริษัท Qualcomm ซึ่งได้รับความร่วมมือจาก AT&T, Motorola และหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้อง IS-95 เป็น direct-sequence CDMA ที่ผู้ใช้แต่ละคนจะมี pseudorandom code ที่ไม่เหมือนกัน ปี 1988, The Cellular Telecommunications Industry Association (CTIA) กำหนด User's Performance Requirements (UPR) สำหรับ cellular carrier's ในระบบ cellular ยุคต่อไป ซึ่ง IS-95 สามารถสนองต่อข้อกำหนดต่างๆ ได้ ดังนี้

- Ease of transition and compatibility with existing analog system
- Early availability and reasonable costs for dual-mode radios and cells
- Substantial capacity increase over analog system capacity
- Privacy Long life adequate growth of second-generation technology
- Quality improvements (voice quality, service quality in terms of dropped calls, constant voice quality level, etc.)
- Ability to introduce new features easily

ในการใช้ข้อกำหนดที่สำคัญมากและทำให้ CDMA เป็นที่ยอมรับเพราะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงคือ Dual-mode operation ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ CDMA channel ในช่วงความถี่ของ AMPS เมื่อผู้ใช้เปิดเครื่อง เครื่องลูกข่ายจะหา CDMA control channel ถ้าเจอก็จะเริ่มสื่อสาร โดยใช้ CDMA protocol ถ้าไม่เจอก็จะหา AMPS control channel และสื่อสาร โดยใช้ระบบ AMPS แทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

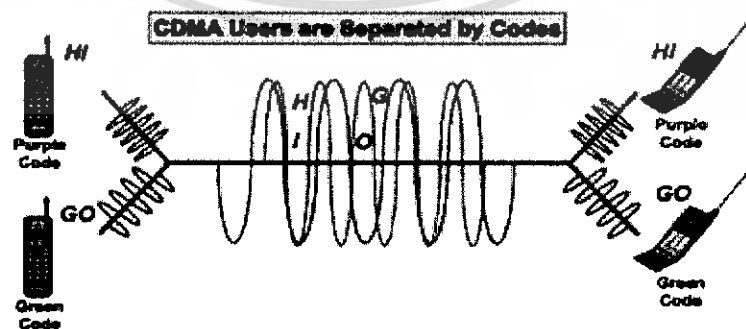


รูปที่ 2.1 กราฟแสดงประมาณการก้าวหน้าของระบบ CDMA

รูปข้างบนแสดงการประมาณการก้าวหน้าของระบบ CDMA โดยมีการเปลี่ยนมาตรฐานที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยพิจารณาได้จากอัตราการรับส่งข้อมูล ซึ่งมีผลทำให้ CDMA สามารถเป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในยุค 3G ได้อย่างเหมาะสมในที่สุด

2.5 การแยกสัญญาณทำได้อย่างไร

CDMA มีวิธีการแบ่งแต่ละสัญญาณด้วยรหัส (Code Division) ผู้ใช้โทรศัพท์ CDMA จะได้รับ Code ที่แตกต่างกัน โดย Code ที่ผู้ใช้แต่ละคนได้รับจะไม่ซ้ำกัน เพราะ วิศวกรออกแบบให้มีถึง 4.4 ล้านล้าน (Trillion Code) ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ CDMA (PN Long Code) ขณะเดียวกันสถานีฐานก็มี Code แยกต่างหาก เพื่อแยกว่ารับสัญญาณจากสถานีฐานไหน (PN Short Code) หลังจากที่เครื่อง CDMA ทำการเข้ารหัสระบบจึงจะส่งสัญญาณออกอากาศ



รูปที่ 2.2 CDMA ภาพจาก Qualcomm Presentation "Basic of CDMA"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ CDMA ใช้ความถี่ 1.25 MHz (1,250 Hz) ซึ่งเมื่อเทียบกับ 30 KHz (Amps) และ 200 KHz (GSM) CDMA ใช้ช่องความถี่ที่กว้างกว่าระบบที่กล่าวมามาก CDMA ให้ความถี่เดียวกับผู้ใช้งาน และสามารถนำความถี่เดิมไปใช้อีก (Universal Frequency Reuse) ซึ่งช่วยลดปัญหาการวางแผนความถี่ (Frequency Planning)

CDMA ใช้วิธี Spreading signal คือการแปลงสัญญาณเสียงเป็น Digital และ ขยาย (Spread) ด้วย Code แบบ 0 และ 1 ข้อมูล (Voice หรือ Data) จะถูกขยายด้วย Code จำนวน Bit จะเพิ่มขึ้นก่อนส่งออกอากาศ จึงต้องใช้ช่องสัญญาณที่กว้าง ข้อดีของการ Spreading คือ สัญญาณจะขยายมากขึ้นถึง 21 dB จึงไม่จำเป็นต้องใช้กำลังส่งสูง CDMA มีการควบคุมกำลังส่ง ที่ช่วยให้การส่งสัญญาณเป็นไปอย่างเหมาะสม เช่น หาก MS อยู่ใกล้กับ BTS จะใช้กำลังส่งน้อย ผู้ใช้จึงสนทนาได้นานขึ้น โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่น้อยลง ทั้งยังเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานของโทรศัพท์ TDMA และ CDMA ถือได้ว่าเป็นระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 (2G)

2.6 โครงสร้างของระบบ CDMA

ด้วยแรงจูงใจจากความสำเร็จของ turbo codes วิธี Iterative multi-user Detection(MUD) ได้มีการนำมาศึกษาอย่างกว้างขวางในช่วงที่ผ่านมา ซึ่งภาพจำลองของระบบ Iterative MUD ได้แสดงไว้ในรูปที่

ทางฝั่งภาครับของโครงสร้างระบบ ข้อมูลของผู้ใช้จำนวน k คน จะถูกเข้ารหัสสัญญาณก่อนเป็นอันดับแรกโดยใช้ FEC (forward error correction) จากนั้นจะถูกส่งผ่านไปเข้าสู่กระบวนการทำ Interleave ก่อนจะส่งไปสู่กระบวนการ Spreading operation เพื่อสร้างสัญญาณที่จะถูกส่งออกไปยังโครงสร้างทางภาครับผ่านทาง Multiple access channel

โครงสร้างทางฝั่งภาครับจะนำสัญญาณที่ส่งมา ไปผ่าน Bank of correlator เพื่อทำการแยกข้อมูลของ user แต่ละคน โดยจะมี spreading sequence เป็นตัวแยก user แต่ละคน เพราะแต่ละ user จะได้รับ spreading sequence ที่ไม่เหมือนกัน จากนั้นก็จะเริ่มต้นสู่กระบวนการ turbo process ที่ประกอบด้วย 2 ฟังก์ชัน ได้แก่

- (i) Elementary Multi-user Detector(EMUD)
- (ii) bank of K soft-in-soft-output decoders(DECs)

ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการนี้ จะมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงยึดหลักกับตัว C ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัว

Encoder

จากรูปที่ 2.3 ทางฝั่งภาครับจะต้องพิจารณาข้อจำกัดที่สำคัญ 2 ข้อ คือ

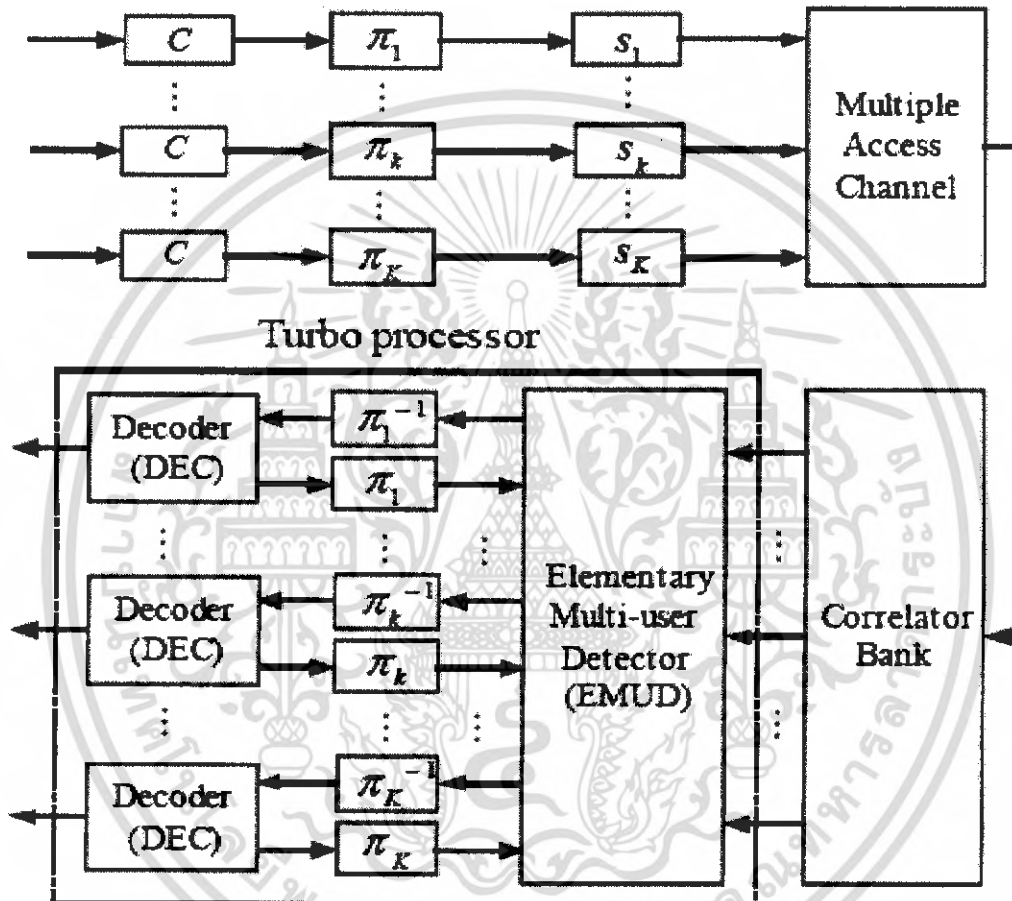
1. FEC
2. ความสัมพันธ์กันระหว่าง signature sequence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาวิธีแก้ปัญหาร่วมที่ดีที่สุดโดยปกติแล้วเป็นเรื่องที่ยาก แต่กระบวนการ turbo process สามารถแก้ปัญหาร่วมนี้ได้เกือบจะสมบูรณ์ที่สุด โดยแบ่งหน้าที่ออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. การควบคุมกระบวนการ EMUD (ii) และการละเอียด(i)
2. กระบวนการ DECs process และการละเอียด(ii)

จากนั้นกระบวนการ Iterative จะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงผลลัพธ์ของสัญญาณ



รูปที่ 2.3 Conventional CDMA transmitter and iterative MUD receiver.

ว่ากันโดยทั่วไปแล้ว ในรูปที่ 2.3 ความซับซ้อนของตัว DEC ในแต่ละ user ไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของ user ที่ใช้งานพร้อมกัน ในทางตรงข้าม ความซับซ้อนของ EMUD ต่อ User จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยตัวแปร K (จำนวนของ user) ยกตัวอย่างเช่น ค่าความซับซ้อนของเทคนิค MMSE คือ $O(K^2)$ ซึ่งจะต้องระมัดระวังเมื่อ K หรือจำนวน user มีค่ามาก

ดังนั้น เราจึงต้องการที่จะลดค่า EMUD ลงโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อ DEC หลักการที่นี้จะสามารถนำมาใช้ในเรื่องนี้ได้ คือการย้ายเอากระบวนการ spreading operation เข้าไปใน FEC coding เพื่อลดค่าความซับซ้อนของตัว EMUD ที่สัมพันธ์กันกับ Spreading operation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากประเด็นเรื่องค่าของEMUDแล้ว ยังมีประเด็นเรื่องทฤษฎีอีกหนึ่งเรื่อง ถึงแม้ระบบ RW-CDMA ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น IS-95 ที่มีข้อดีในด้าน multi-cell cellular environment ระบบนี้จะมีค่า throughput ค่อนข้างต่ำ ในsingle-cell environment เมื่อเทียบกับ FDMA และ TDMA ซึ่งเป็นผลมาจากผลกระทบของ same-cell-user MAI แต่อย่างน้อยที่สุด ตามทฤษฎีแล้วก็ไม่ได้ก่อให้เกิดผลเสียขึ้นแม้จะอยู่ใน single-cell environment ทำให้สามารถออกแบบ signaling method ได้อย่างสมบูรณ์

สมมติให้ R เป็นอัตราส่วนของ FEC code กับ N (ความยาวของ signature sequence ที่ใช้ในการแผ่ขยายสัญญาณ) สมมติให้ทุกๆ user มีค่า R และ N ที่เท่ากันหลังจาก multiple access โดยuser จำนวน K users ค่าเฉลี่ยของบิตข้อมูล ($R \times K / N$) จะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณระหว่างแต่ละชิพ

ดังนั้น เราจึงสามารถกล่าวอ้างได้ว่า $R \times K / N$ เป็นค่า throughput ของระบบ เรากำหนดให้ η เป็นค่าสูงสุดของที่สามารถทำได้สำเร็จ โดยให้ค่า R ที่น่าเชื่อถือที่นำมาใช้ได้ในการสื่อสาร η สามารถเรียกอีกอย่างว่าเป็น spectral efficiency

2.7 ข้อดีของระบบCDMA

2.7.1) ความสามารถในการรองรับปริมาณผู้ใช้งานที่มากกว่า (Capacity)

2.7.2) CDMA เป็นเทคโนโลยีที่แก้ไขข้อจำกัดของการสื่อสารไร้สาย ในเรื่องความจุของช่อง สัญญาณ เนื่องจากระบบ CDMA จะลดข้อมูลในการส่ง สัญญาณลงเมื่อไม่มีการพูด

2.8 ข้อดีของ CDMA technology

เมื่อไม่มีข้อมูลที่ส่งหรือมีน้อย กำลังส่งจะลดลง สัญญาณรบกวนในระบบมีน้อย และความยืดหยุ่น ของรูปแบบการส่งข้อมูล (Radio Configuration) ทำให้ CDMA รองรับผู้ให้บริการได้มากกว่า และ บริหารทรัพยากร ได้เหมาะสมกว่าระบบอื่นๆ

2.8.1. การส่งผ่านสัญญาณที่ราบรื่น ลดปัญหาสายหลุด (Soft hand-off)

การส่งผ่านสัญญาณ(Handoff) ของเครือข่าย CDMA ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐาน เครื่องลูกข่ายจะทำการส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับหลายสถานีฐานพร้อมกัน (Soft Handoff) เพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนที่สุด ก่อนที่จะเลือกส่งผ่านสัญญาณไปที่สถานีฐานที่มีสัญญาณชัดเจนที่สุดต่างจากระบบอื่นที่เชื่อมต่อสัญญาณได้เพียงครั้งละหนึ่งสถานีฐาน (Hard Handoff) การมี Soft handoff สามารถลดจำนวนครั้งและความถี่ของปัญหาสายหลุด ลดสัญญาณรบกวน ผู้ใช้จะสามารถสื่อสารอย่างราบรื่นและต่อเนื่อง

2.8.2. ความคมชัด และคุณภาพของเสียงในการติดต่อสื่อสาร (Rake Receiver)

ความคมชัด และ คุณภาพของเสียงในการติดต่อสื่อสารที่เหนือกว่าระบบอื่น ด้วยเทคโนโลยี 2G ที่รวมสัญญาณจากทุกทิศทาง (Multi-path Advantage) เพื่อให้ได้สัญญาณที่เข้ม และหนาแน่น ตามปกติสัญญาณวิทยุจะมีการสะท้อนกับวัตถุรอบข้าง เช่น ภูเขา, ตึก, สิ่งก่อสร้าง, พื้นฟ้า ซึ่งสัญญาณตรง และสัญญาณสะท้อนมักจะรบกวนกัน แต่ระบบ CDMA มีชุดรับสัญญาณถึง 3 ชุด (Rake Receiver) ในการรับสัญญาณแต่ละครั้ง โดยเครื่องจะเลือกประมวลสัญญาณที่ชัดเจน ที่สุด ซึ่งเทคนิคการประมวลสัญญาณเสียงของระบบ CDMA จะทำให้ได้เสียงที่มีคุณภาพ สำหรับการสนทนาที่ชัดเจน และ ลดเสียงรบกวนให้น้อยที่สุด

2.8.3. ลดความสิ้นเปลืองพลังงานจากแบตเตอรี่ (Power Control)

ด้วยเทคโนโลยีการประมวลสัญญาณเสียง และการตรวจสอบสัญญาณ ระหว่างเครื่องลูกข่าย และ สถานีฐานอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการควบคุมกำลังส่ง (Power control) เมื่อเครื่องลูกข่ายอยู่ใกล้สถานีฐาน หรือ สัญญาณมีความชัดเจนมาก กำลังส่งจะลดลง โดยการใช้กำลังส่งที่เหมาะสมกับการใช้งาน ทำให้การรบกวนของสัญญาณลดลง และ การส่งสัญญาณแบบยืดหยุ่น ผู้ใช้จึงสามารถสนทนาได้นานขึ้น โดยสิ้นเปลืองพลังงานของแบตเตอรี่น้อยลง ทั้งยังยืดอายุ การใช้งานของแบตเตอรี่

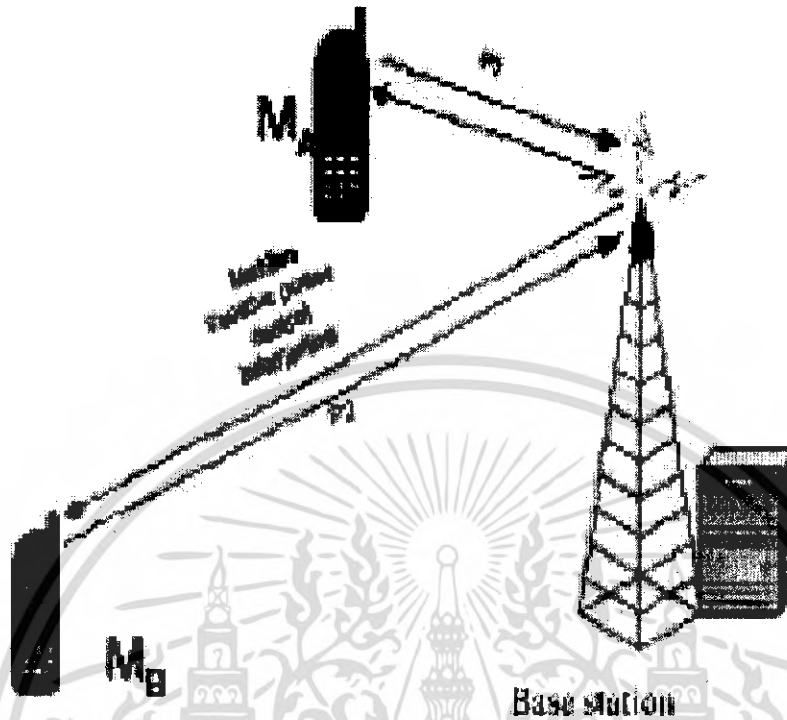
2.8.4. ความปลอดภัยของสัญญาณออกอากาศ

ผู้ใช้น่าจะมั่นใจได้ว่าทุกการสื่อสารและการรับส่งข้อมูลจะปลอดภัย และเป็นส่วนตัว เนื่องจากการส่งสัญญาณของระบบ CDMA ที่ใช้รหัส (codes) หลายชุด เช่น PN Long Code, PN Short Code, Walsh code ซึ่ง PN Long Code มีหน่วยของรหัสมากถึง 4.4 ล้านล้านหลัก รหัสเหล่านี้นอกจากจะช่วยในการแบ่งแยกผู้ใช้งานในระบบ CDMA แล้ว ยังจะช่วยป้องกัน การลอกเลียนแบบ และ ลดความผิดพลาดในการสื่อสารของระบบ CDMA อีกด้วย

2.9 ปัญหาของระบบCDMA

2.9.1 Near-Far problem

ปัญหา Near-Far problem คือ ฟังผู้รับไม่สามารถรับสัญญาณที่ต้องการได้อย่างครบถ้วน สมบูรณ์ เนื่องจากปัญหา Multiple Access Interference



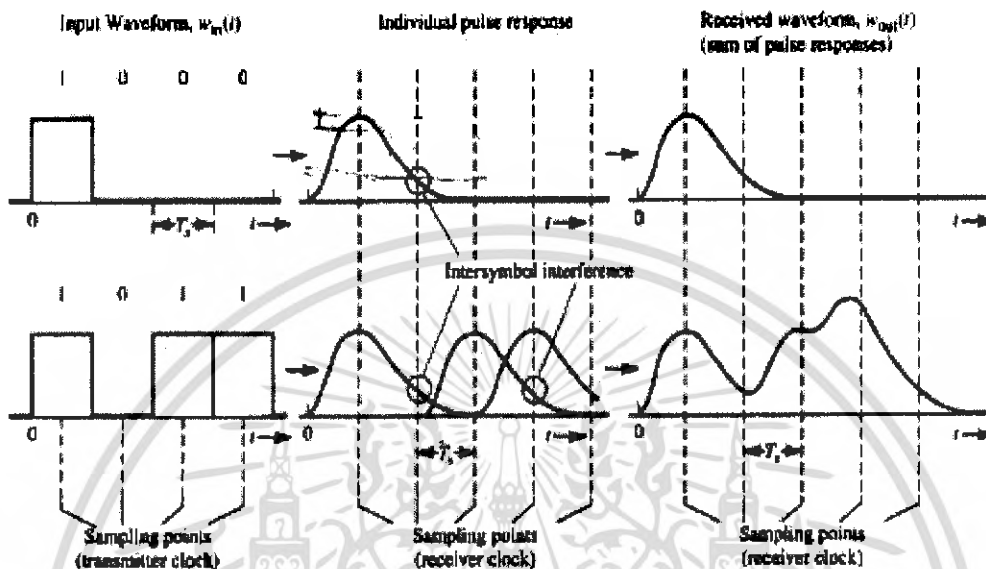
รูปที่ 2.4 ภาพจำลองการเกิดปัญหา Near-Far Problem

จากรูปด้านบน ที่สถานีฐานไม่สามารถรับสัญญาณจากเครื่องส่ง M_B ได้ M_A จึงต้องลดกำลังงานในการส่งสัญญาณของตัวเองลงเพื่อจะได้ไม่ไปรบกวน M_B ต้องมีการควบคุมกำลังส่ง ดังนั้นที่สถานีฐานจะได้รับสัญญาณที่เท่ากัน

2.9.2 Intersymbol Interference (ISI)

มีลักษณะเป็นคลื่น output ที่เป็น pulse ในรูปของ Time Domain เกิดการซ้อนทับกับ pulse ที่อยู่ข้างเคียง ดังรูปที่แสดงต่อไปนี้

Inter-Symbol Interference (ISI)



รูปที่ 2.5 แบบจำลองคลื่นที่เกิด Fading จากการส่งแบบ Multipath

2.9.3 Fading Problem

Fading แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

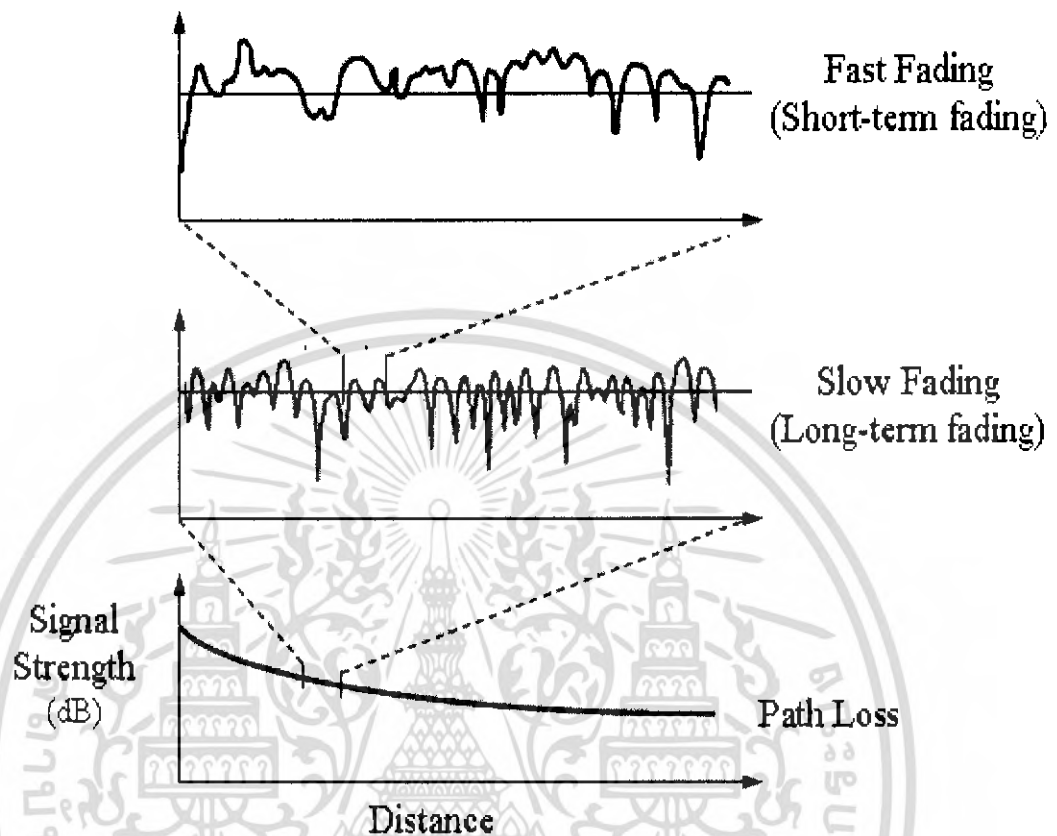
2.9.3.1 Fast fading

2.9.3.2 Slow fading

โดย slow fading จะประกอบด้วย flat fading แต่ Selective fading, Rayleigh fading และ Rician fading นั้น อาจจะเป็นได้ทั้ง Fast Fading และ Slow Fading โดยจะขึ้นอยู่กับ Bandwidth ของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fading



รูปที่ 2.6 กราฟที่แสดงถึง Fading problem รูปแบบต่างๆ

- Slow fading

เป็นการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบ Long term ในระดับค่าเฉลี่ย เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณ

Log-normal distribution

The pdf ระดับสัญญาณที่ได้รับจะอยู่ในรูปของ (dB)

$$p(M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(M-\bar{M})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.1)$$

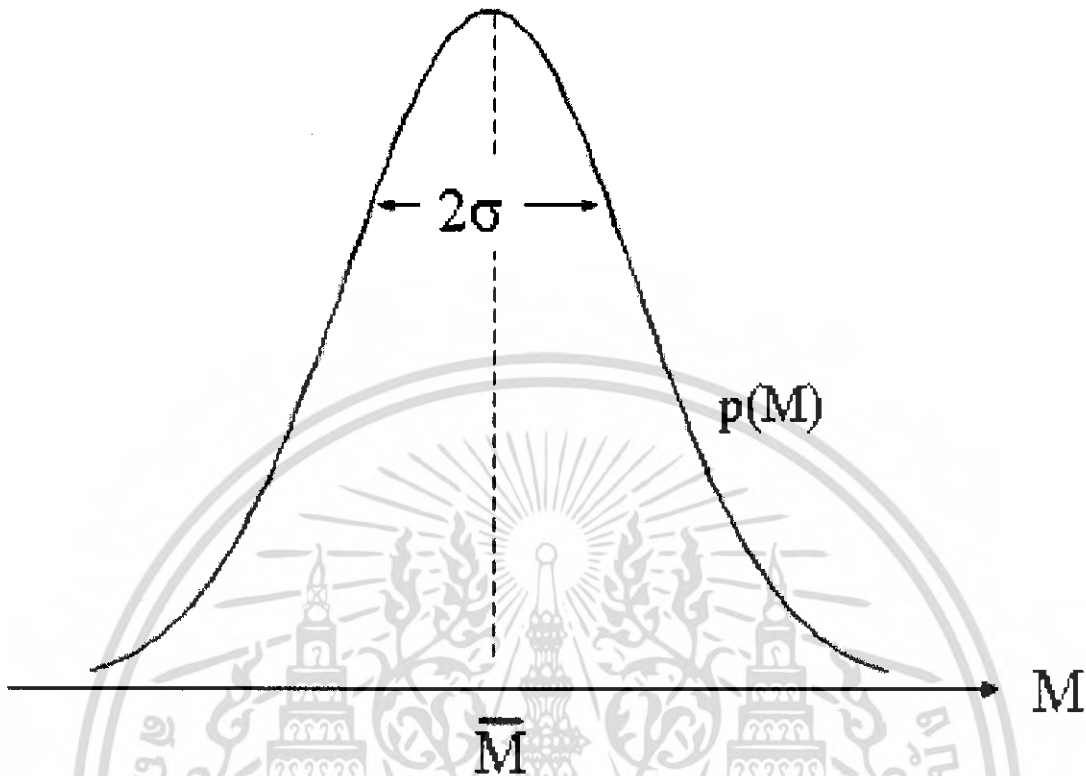
โดยที่ M คือ true received signal level m in decibels, i.e., $10\log_{10}m$,

\bar{M} คือ area average signal level, i.e., the mean of M ,

σ คือ Standard deviation in decibels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Log-normal Distribution



รูปที่ 2.7 รูปกราฟ Power Density Function ของระดับสัญญาณที่ได้รับ

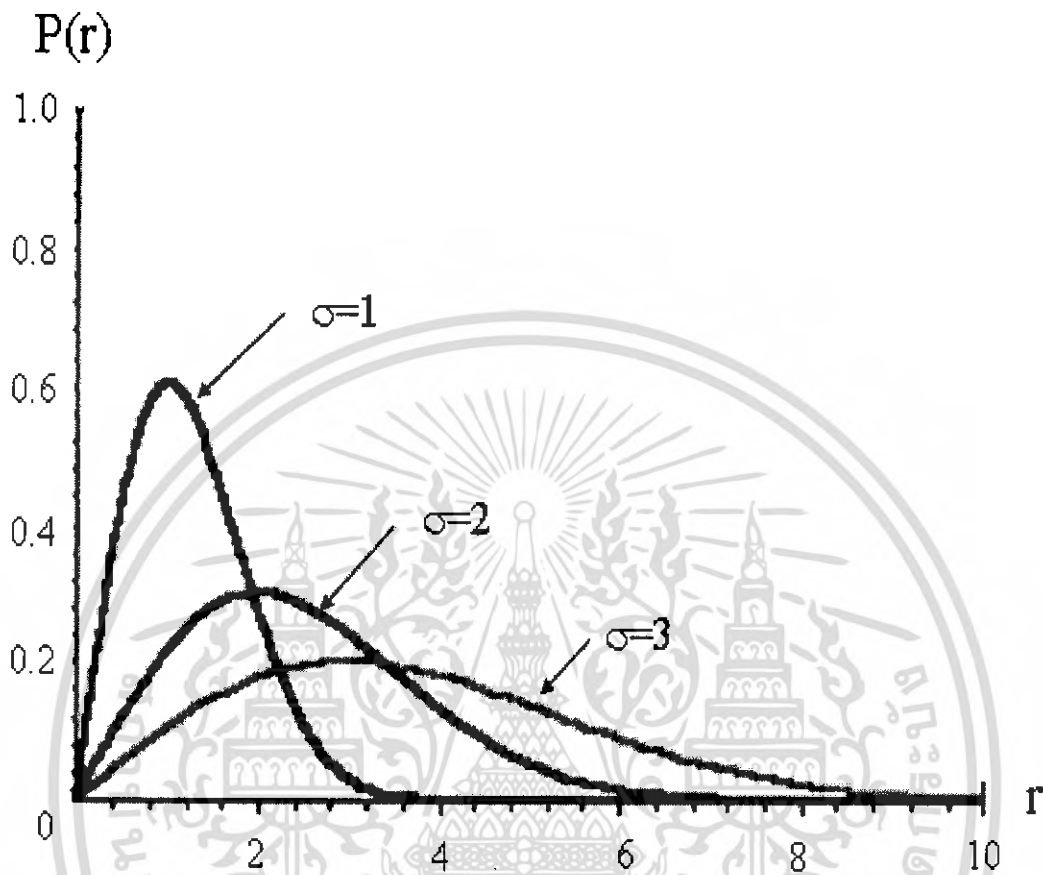
- Fast Fading

สัญญาณที่เดินทางมาจากเครื่องส่ง อาจเกิดการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น อาคาร ภูเขา หรือยานพาหนะต่างๆ เมื่อ MS อยู่ห่างจาก BS รูปแบบการแพร่กระจายที่มาถึงฝั่งรับจะอยู่ในรูปแบบ Rayleigh fading รูปแบบสมการ pdf เป็นดังนี้

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, r > 0 \quad (2.2)$$

โดยที่ σ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

Rayleigh Distribution



รูปที่ 2.8 The pdf of the envelope variation

หรือ อาจจะอยู่ในรูปแบบของ Rician Distribution โดยมีรูปแบบสมการ pdf ดังนี้

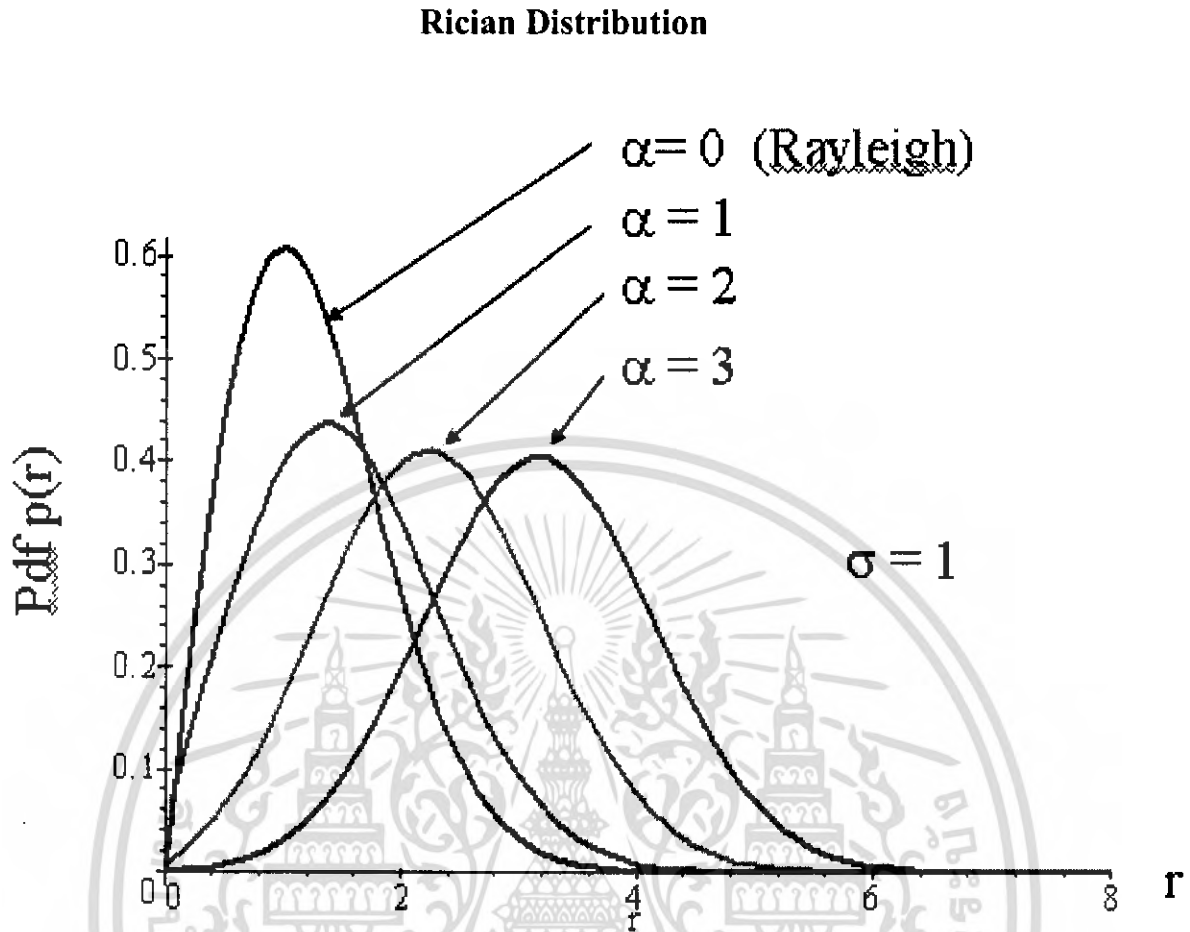
$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2 + \alpha^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{r\alpha}{\sigma}\right), r \geq 0, \quad (2.3)$$

โดยที่ σ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$I_0(x)$ เป็นค่า zero-order Bessel function of the first kind

α เป็นค่าแอมพลิจูดของ Direct signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 The pdf of the envelope variation

จากข้อมูลข้างต้นชี้ให้เห็นข้อดี ข้อเสีย จุดอ่อน จุดแข็ง ข้อบกพร่องต่างๆของระบบ CDMA ซึ่งเป็นระบบการสื่อสารที่ใช้อยู่ในยุค 3rd G ดังนั้น ในยุคการสื่อสารต่อไปซึ่งก็คือ ยุค 4th G จะต้องมีการพัฒนาระบบการสื่อสารขึ้นเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านี้ ซึ่งในยุค 4th G มีหลักการการสื่อสารดังนี้คือ

1. มี Bandwidth ที่มีประสิทธิภาพ
2. ใช้พลังงานในการส่งที่ต่ำลงโดยยังคงประสิทธิภาพในการส่งไว้ได้ดี
3. เครื่องที่ทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณมีความซับซ้อนน้อยลง
4. ต้องเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นต่ออัตราของข้อมูล (link adaptation), ความเชื่อถือได้ของข้อมูล (QoS) และการให้บริการ

ดังนั้น ในปริภูมิพันธบัตรฉบับนี้จึงนำเสนอระบบที่ตอบสนองความต้องการดังกล่าวมา คือ ระบบการสื่อสาร IDMA

72663

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 Interleaver

ระบบการสื่อสารแบบ IDMA ได้มีการดัดแปลงปรับปรุงมาจากการสื่อสารแบบ CDMA ปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบ CDMA ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีบางอย่างเช่น การแบ่งการใช้ช่องสัญญาณ การลดปัญหาการแทรกสอดข้ามเซลล์กัน มีการป้องกันการ Fading ที่ดี เป็นต้น ซึ่งระบบ IDMA ได้คงคุณสมบัติที่ดีต่างๆ เหล่านี้ของระบบ CDMA ไว้ แต่ข้อเสียของระบบ CDMA ก็คือ เมื่อผู้ส่งสามารถใช้สื่อในการส่งข้อมูลร่วมกันได้ ดังนั้นสัญญาณที่มาจาก user ที่ต่างกันก็จะซ้อนทับกัน ทำให้เกิดปัญหา Multiple Access Interference (MAI) ดังนั้นที่ฝั่งภาครับจึงต้องมีเทคนิคที่ใช้ในการแยกสัญญาณที่ส่งมาแบบรวมกัน ซึ่งก็คือ Multi-user Detection (MUD) แต่ก็ยังคงเป็นปัญหาสำหรับระบบ CDMA เพราะเมื่อจำนวนผู้ใช้งานจำนวนมาก ความซับซ้อนของตัวตรวจจับสัญญาณทางฝั่งภาครับก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อการแก้ปัญหานี้ ในระบบ IDMA จึงใช้ตัว Interleaver เป็นตัวแยกสัญญาณของแต่ละ user และลดความซับซ้อนของ MUD ในระบบ multipath channels ที่มีจำนวนผู้ใช้งานจำนวนมาก

การ Interleave ข้อมูลนั้นเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงข้อมูลดิจิทัล ให้มีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากเดิม ซึ่งถูกนำมาใช้ในระบบสื่อสารเพื่อป้องกันการผิดพลาดของข้อมูลในรูปแบบของ Burst Error แต่สำหรับกรณีของวงจรเข้ารหัสแบบ Turbo Codes นั้น จะมีการนำการ Interleave มาใช้งาน โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ข้อมูลที่ได้ออกจากการเข้ารหัสจากวงจรเข้ารหัสต่าง ๆ นั้น มีลักษณะของข้อมูลที่ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยจะเป็นการนำข้อมูลดิบที่จะทำการเข้ารหัสในวงจรเข้ารหัสต่าง ๆ มาผ่านการ Interleave เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูล (permutation) เพื่อให้ข้อมูลที่ถูกรหัสนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน

สำหรับวิธีการที่ใช้ในการ Interleave ข้อมูลนั้น จะมีรูปแบบในการทำงานอยู่หลายวิธีการด้วยกันและในการทำงานแต่ละวิธีการนั้น จะให้ผลลัพธ์ในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยสำหรับตัวอย่างของรูปแบบในการ Interleave ข้อมูล ได้แก่ วิธีการ Interleave ข้อมูลแบบ Block Interleave และ Random Interleave

2.10.1 Block Interleave

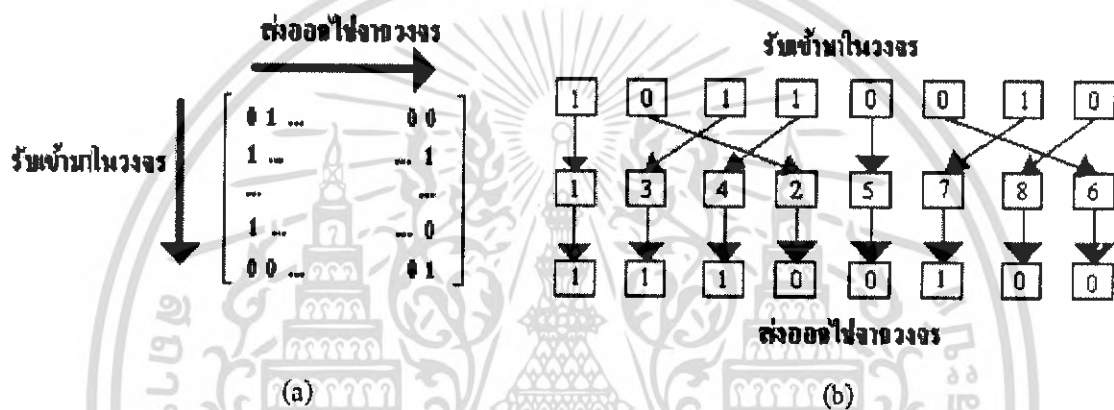
สำหรับการ Interleave ข้อมูลด้วยวิธีการ Interleave ข้อมูลแบบ Block Interleave นั้น จะเป็นวิธีการที่มีการนิยามใช้งานสำหรับระบบสื่อสาร โดยในการทำงานเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลนั้น จะมีลักษณะการทำงานที่สามารถแสดงการทำงานโดยใช้เมตริกดังรูปที่ 2.10(a) โดยในการทำงานนั้น จะเป็นการดึงข้อมูลที่จะทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเข้ามาเก็บไว้ในเมมโมรี่ โดยจะมีการเก็บข้อมูลเรียงจากบนลงล่างและ ซ้ายไปขวา โดยจะมีการเก็บข้อมูลในลักษณะนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมมโมรี่ในวงจรมีการเก็บข้อมูลไว้ทุกตำแหน่งแล้ว จากนั้นจึงส่งข้อมูลออกจากวงจรโดยการเรียงลำดับการส่งจากซ้ายไปขวา และ บนลงล่าง และจะมีการส่งข้อมูลในลักษณะนี้เรื่อยๆ จนกระทั่งข้อมูลทุกตำแหน่งในเมมโมรี่ถูกส่งออกจากวงจรแล้ว จากนั้นจึงมีการรับข้อมูลชุดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามาในวงจรเพื่อทำงานในครั้งต่อไป โดยจะมีการทำงานในลักษณะนี้ จนกระทั่งข้อมูลทั้งหมดได้ผ่านกระบวนการ Interleave แล้ว จึงสิ้นสุดการทำงาน

2.10.2 Random (Pseudo-Random) Interleave

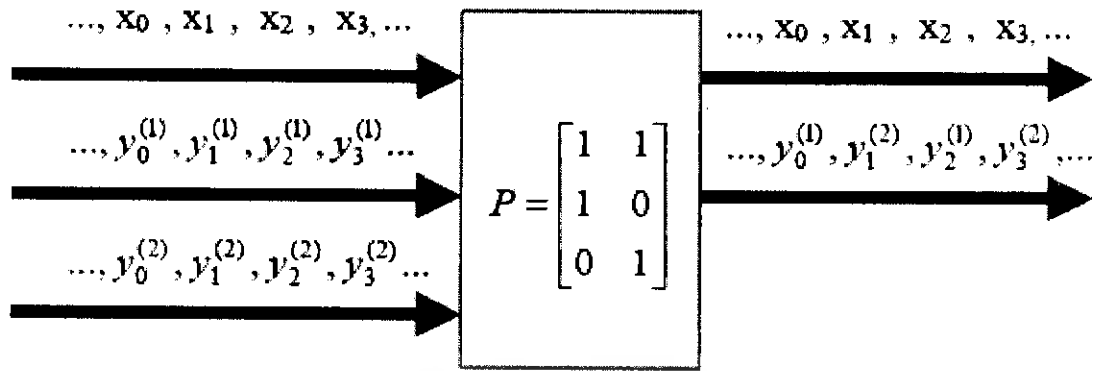
ในการInterleave ข้อมูลด้วยวิธีการแบบ Random Interleave นั้น จะมีการใช้การสุ่มตัวเลขขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับกำหนดรูปแบบในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล โดยในการนำงานนั้น จะมีการนำข้อมูลมาครั้งละ 1 ชุด เพื่อทำการสลับตำแหน่งของข้อมูลให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆตามรูปแบบของค่าที่ได้จากการสุ่ม โดยจะมีลักษณะในการทำงานดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10(b) ที่เป็นตัวอย่างของ การ Interleave แบบ Random Interleave ที่มีการดึงข้อมูลเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 8 บิตเพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล



รูปที่ 2.10 การ Interleave ข้อมูล (a) Block Interleave , (b) Random Interleave

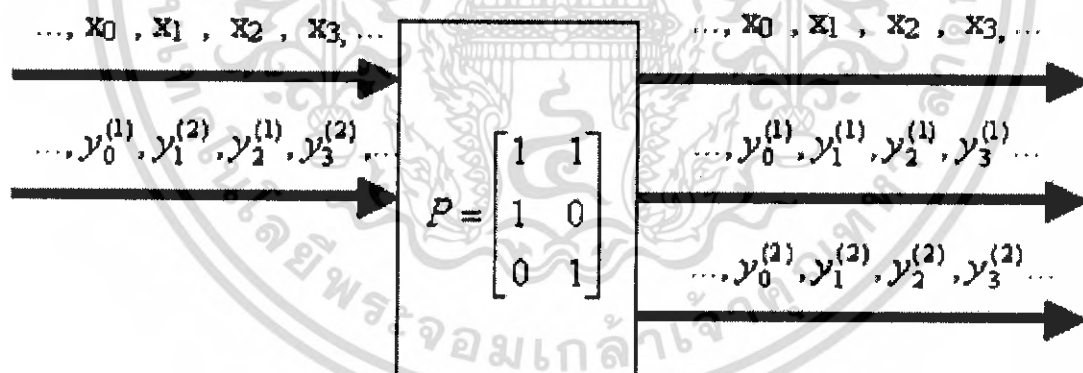
2.10.3 การ Punctured ข้อมูล

การทำงานของภาค Puncture ถูกนำมาใช้ในวงจรเข้ารหัส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้จำนวนบิตของข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านระบบสื่อสารนั้น มีจำนวนที่ลดลง โดยจะเป็นการลบข้อมูลที่จะทำการส่งบางส่วนออกไปตามรูปแบบที่มีการกำหนดไว้ โดยในการแสดงถึงรูปแบบในการทำงานนั้น จะมีการแสดงถึงรูปแบบในการลบข้อมูลที่จะทำการส่งโดยใช้ตัวแปรเมตริกที่จะแสดงถึงรูปแบบในการลบข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส ดังเช่นเมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสจากวงจรเข้ารหัสแบบ Turbo Codes ในรูปที่ 1 จะมีลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการ puncture เป็นดังรูปที่ 9



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างวิธีการ Puncturing

โดยในกรณีของวงจรในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่แสดงถึงรูปในการทำงานของภาค puncture นั้น จะเป็นการลดจำนวนบิตของข้อมูลในส่วนของการทำงานของวงจรเข้ารหัส ($y_k^{(1)}$ และ $y_k^{(2)}$) ให้มีค่าลดลง โดยจะทำการสลับกันส่งข้อมูลระหว่างสัญญาณ $y_k^{(1)}$ และ $y_k^{(2)}$ ดังนั้นจะทำให้อัตราการเข้ารหัสข้อมูลของการเข้ารหัสนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นจาก $1/3$ เป็น $1/2$ ในทางกลับกัน เมื่อข้อมูลต่าง ๆ นั้นถูกส่งมาถึงปลายทาง จะต้องมีการนำข้อมูลมาทำการ Depuncture เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลที่รับได้ให้กลับมาอยู่ในรูปแบบเดิม ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีการ puncture ข้อมูลที่ได้จากการถอดรหัสดังรูปที่ 2.11 จะได้ว่าเมื่อข้อมูลถูกส่งมาถึงภาครับ จะต้องมีการนำข้อมูลมาผ่านภาค Depuncture ซึ่งจะมีรูปแบบในการทำงานดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างวิธีการ Depuncture

2.10.4 การถอดรหัสข้อมูลสำหรับ Turbo Codes

สำหรับวิธีการที่ใช้ในการถอดรหัสข้อมูลสำหรับ Turbo Codes จะมีรูปแบบในการทำงานเป็นแบบ Iterative Decoding โดยในการทำงานนั้น จะเป็นการนำข้อมูลที่รับเข้ามาได้มาผ่านกระบวนการเพื่อคำนวณหาความเป็นไปได้ของค่าของข้อมูลดิบที่จะถูกส่งมา ณ เวลาต่างๆ ที่อยู่ในรูปของค่าที่เรียกว่า extrinsic information และจะเป็นข้อมูลส่วนที่ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณในการถอดรหัสครั้งต่อไปเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยจะมีการวนรอบในลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการทำงานครบตามที่กำหนด จากนั้นจึงนำค่า log A posteriori probability (LAPP) ที่ได้จากการทำงานมาใช้ในการตัดสินใจค่าของข้อมูลคิบที่ได้จากการทำงานของวงจรถอดรหัส

สำหรับการทำงานของวงจรถอดรหัสที่ใช้ในการถอดรหัสแบบ Turbo Codes นั้น จะมีการนำหลักการในการถอดรหัสแบบ Maximum a posteriori (MAP) มาใช้ในกระบวนการถอดรหัสของวงจรถอดรหัสDEC1 และ DEC2 โดยจะเป็นรูปแบบในการถอดรหัสข้อมูลที่มีการพิจารณาหาค่าของข้อมูลคิบที่ได้หลังจากการถอดรหัสโดยการพิจารณาจากนำข้อมูลจำนวน n_0 บิตที่รับได้ที่ปลายทางในแต่ละช่วงเวลามาทำการคำนวณหาความเป็นไปได้ว่าข้อมูลคิบถูกส่งมา ณ เวลานั้นมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าเป็นข้อมูลใด โดยสำหรับรูปแบบและวิธีการในการทำงานนั้น จะมีวิธีการในการทำงานอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน แต่วิธีการที่มีการนิยมใช้งานมากได้แก่วิธีการ BC & Algorithm ซึ่งถูกค้นพบโดย Bahl ในปี พ.ศ. 2517 (ค.ศ.1974) โดยในการถอดรหัสข้อมูลเพื่อหาว่าของข้อมูลคิบ d_k ที่คาดว่าจะถูกส่งมา ณ เวลานั้นๆว่าควรจะมีค่าเท่าใด โดยจะมีการพิจารณาจากค่าที่เรียกว่า log a posteriori probability (LAPP) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$L(u_k) = \log\left(\frac{P(d_k = +1|R_k)}{P(d_k = -1|R_k)}\right) \quad (2.4)$$

โดยตัวแปร d_k นั้นจะเป็นตัวแปรที่ใช้แทนข้อมูลคิบที่ได้จากการถอดรหัส ณ เวลานั้นๆ โดยสำหรับกรณีสมการที่ 2.4 นี้เป็นกรณีที่มีการส่งข้อมูลโดยใช้วิธีการมอดูเลตแบบ BPSK ดังนั้นข้อมูลคิบที่จะถูกส่งมานั้นจะมีค่าเท่ากับ +1 หรือ -1 ซึ่งแทนข้อมูลไบนารี 1 หรือ 0 เท่านั้น และสำหรับค่า LAPP นี้จะเป็นตัวแปรที่จะถูกนำมาใช้สำหรับการตัดสินใจว่าข้อมูลที่จะถูกส่งมา ณ เวลานั้นๆ น่าจะมีค่าเป็นเท่าใด และตัวแปร R_k นั้นเป็นตัวแปรที่แทนสัญญาณข้อมูลที่ได้รับ ณ ช่วงเวลาต่างๆ โดยถ้าหากว่าค่า LAPP ที่ได้จากการคำนวณชุดข้อมูล ณ เวลานั้นๆมีค่ามากกว่า 0 จะมีการตัดสินใจให้ข้อมูลคิบที่ได้จากการถอดรหัส ณ เวลานั้นมีค่าเท่ากับ +1 ซึ่งแทนข้อมูลไบนารีที่มีค่าเป็น 1 แต่ในกรณีที่ค่า LAPP ที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่า 0 แล้วจะมีการตัดสินใจให้ข้อมูลคิบที่ได้จากการถอดรหัส ณ เวลานั้นมีค่าเท่ากับ -1 ซึ่งแทนข้อมูลไบนารีที่มีค่าเป็น 0

ในปัจจุบัน Interleaver เป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบการสื่อสาร CDMA เนื่องจาก Interleave เป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการช่วยลด error ต่างๆของสัญญาณลงไปได้ เช่น Burst Error ซึ่งมีลักษณะเป็นชุดบิตข้อมูลข้างเคียงที่เกิดความผิดพลาดในสัญญาณ ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการ fading หรือจากความไม่เหมาะสมของสื่อกลางที่ใช้ในการส่งสัญญาณ รวมถึงการเกิดปัญหา Delay ต่างๆด้วย

กลไกของ Interleaver ที่มีขนาดเป็น N ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 เราสมมติให้ข้อมูลทางฝั่ง input ของ Interleaver เป็นข้อมูลแบบไบนารี (เลขฐานสอง) อยู่ในรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_N)$$

โดยที่ $c_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq N$ และข้อมูลที่เป็น output จาก Interleaver อยู่ในรูปแบบ

$$\tilde{c} = (\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \tilde{c}_3, \dots, \tilde{c}_N)$$

โดยที่ $\tilde{c}_j \in \{0,1\}, 1 \leq j \leq N$ ซึ่ง \tilde{c} จะสมาชิกทั้งหมดเหมือนกับ c เพียงแต่สลับตำแหน่งกัน โดยที่ความสัมพันธ์กันแบบ $c \rightarrow \tilde{c}$, ระหว่างสมาชิกแต่ละตัวของ c และสมาชิกแต่ละตัวของ \tilde{c} กำหนดให้เซต A เป็น

$$A = \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (2.5)$$

ดังนั้น Interleaver สามารถระบุได้โดย หนึ่งต่อหนึ่ง index mapping function

$$\pi(A \rightarrow A): j = \pi(i), i, j \in A \quad (2.6)$$

โดยที่ i และ j เป็น index ของสมาชิกในข้อมูลต้นฉบับและในข้อมูลที่ผ่านมาการ Interleaving แล้ว ตามลำดับ Mapping function สามารถเขียนแสดงได้โดย Interleaving vector

$$\pi_N = (\pi(1), \pi(2), \pi(3), \dots, \pi(N)) \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.13 block diagram ของ Interleaver

ยกตัวอย่างเช่น เราพิจารณาที่ pseudo-random interleaver ที่มีขนาดเป็น $N=8$ ให้ข้อมูล input เป็น

$$c = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8)$$

และข้อมูล output ของ Interleaver เป็น

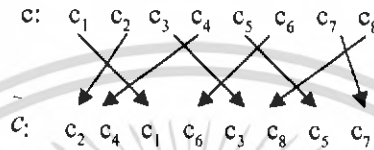
$$\tilde{c} = (\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \tilde{c}_3, \tilde{c}_4, \tilde{c}_5, \tilde{c}_6, \tilde{c}_7, \tilde{c}_8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= (c_2, c_4, c_1, c_6, c_3, c_8, c_5, c_7)$$

Mapping function สามารถเขียนแสดงได้ในรูปที่ 10 Interleaving vector สามารถเขียนแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\pi_8 &= (\pi(1), \pi(2), \pi(3), \pi(4), \pi(5), \pi(6), \pi(7), \pi(8)) \\ &= (3, 1, 5, 2, 7, 4, 8, 6)\end{aligned}$$



Interleaver และ Deinterleaver จะแสดงคุณลักษณะตามค่า Delay และความจุของตัวเก็บข้อมูล ค่า delay ของ Interleaving หรือ Deinterleaving คือค่า Delay ที่มากที่สุดที่พบในสัญลักษณ์ใดๆ ก่อนที่มันจะถูกแทรกเข้าไปในข้อมูลที่เป็น output ความจุของตัวเก็บข้อมูล คือ จำนวนของสัญลักษณ์ที่ถูกเก็บไว้ใน Interleaver หรือ Deinterleaver

2.10.5 Interleaving with Error Control Coding

Interleaving เป็นเทคนิคที่เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับความสามารถในการแก้ไข bit error โดยการเข้ารหัสสัญญาณ ส่วนใหญ่จะใช้งานร่วมกับ error control coding เพื่อแก้ปัญหาเรื่อง Burst error ของช่องสัญญาณ

ทฤษฎีที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับปัญหาเรื่อง Burst error ได้อย่างมีประสิทธิภาพคือการแทรก Interleaver เข้าไปวางระหว่างตัวเข้ารหัสของช่องสัญญาณ และ ช่องสัญญาณ ข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสแล้วจะได้รับการจัดเรียงลำดับใหม่โดยตัว Interleaver จากนั้นจึงจะส่งข้อมูลนั้นๆ ออกไปทางฝั่งภาครับผ่านทางช่องสัญญาณ

ทางภาครับ Deinterleaver จะทำการสลับตำแหน่งข้อมูลให้กลับมาสู่รูปแบบเดิมของข้อมูลต้นฉบับ ผลลัพธ์ที่ได้จากการ Interleaving/Deinterleaving คือ Burst error จะถูกกระจายไปใน time domain ซึ่งเป็นการกระจายข้อผิดพลาดในข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสให้ปรากฏอย่างอิสระ ดังนั้น Burst error channel จะถูกแปลงให้เป็น random error channel ที่ input ของตัวถอดรหัสสัญญาณ

2.11 Convolutional code

การปรับปรุงให้รหัส block code มีความสามารถในการตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดได้มากขึ้นนั้น ทำได้โดยการเติมบิตพาริตีที่เชื่อมเข้าไปบิตที่เพิ่มจากข้อความเดิมนี ถูกเรียกว่า *redundancy bit* การที่เพิ่มบิตเหล่านี้เข้าไปทำให้ต้องเสียกำลังเพิ่มขึ้นในการส่งตามจำนวนบิตที่เพิ่มขึ้นในอีก

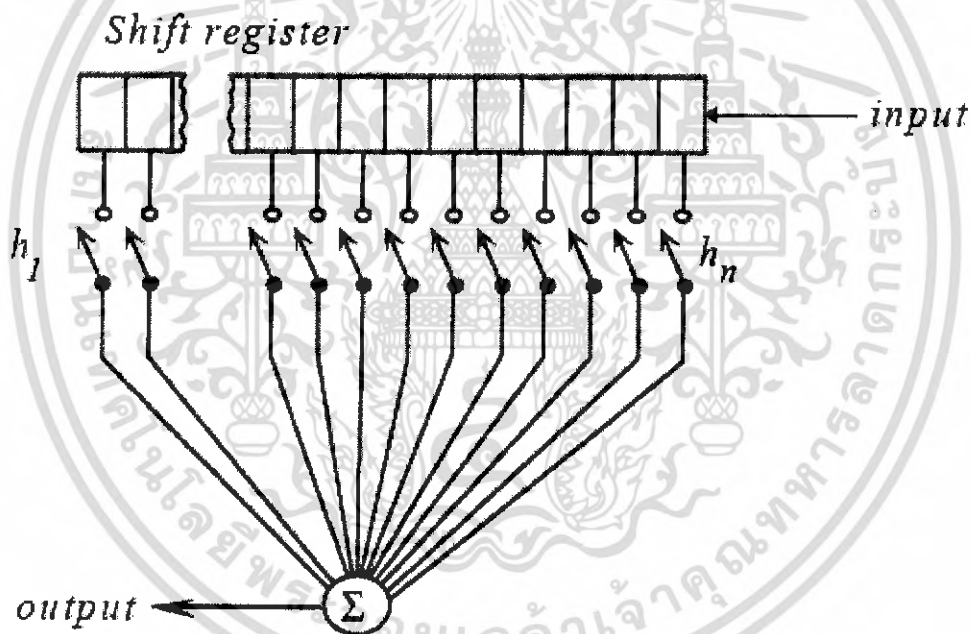
ลักษณะหนึ่งของการเข้ารหัส แทนที่จะพิจารณาเป็นบล็อก จะเข้ารหัสอย่างต่อเนื่องโดยจะสร้างบิตเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จะใช้ในการส่งแต่ละบิต จากการใช้ลำดับของบิตข้อความเดิมมาผสมรวมกันด้วยวิธีการที่แน่นอนแบบหนึ่งที่อาจไม่ต้องเติม redundancy bit เพิ่มเลย

เทคนิคที่ใช้ในการสร้างลำดับของบิตที่ใช้ในการส่ง คือ ทำการคอนโวลูชัน (convolution) ระหว่างลำดับข้อความเดิมกับลำดับโบนารีที่กำหนดตายตัวแบบหนึ่งให้ บิตที่จะส่งใดๆ เป็น m สร้างจากการรวมกันของลำดับบิตข้อความเดิม $S_n, S_{n-1}, S_{n-2}, \dots, S_{n-k}$ ตามสมการคอนโวลูชันดังสมการ 2.8 ดังนี้

$$t_n = \sum_{k=-\infty}^n s_k h_{n-k} \quad (2.8)$$

โดย h ในสมการคือ '0' หรือ '1' การบวกกันแบบ modulo-2 จากสมการสามารถสร้างโดยใช้วงจร shift register และ modulo-2 adder รูปที่ 2.14 เป็นการสร้างวงจรของการเข้ารหัสโดยทั่วไป ถ้าสวิตช์ ในรูปปิด หมายถึง h เป็น '1' และถ้าสวิตช์เปิดหมายถึง h เป็น '0'

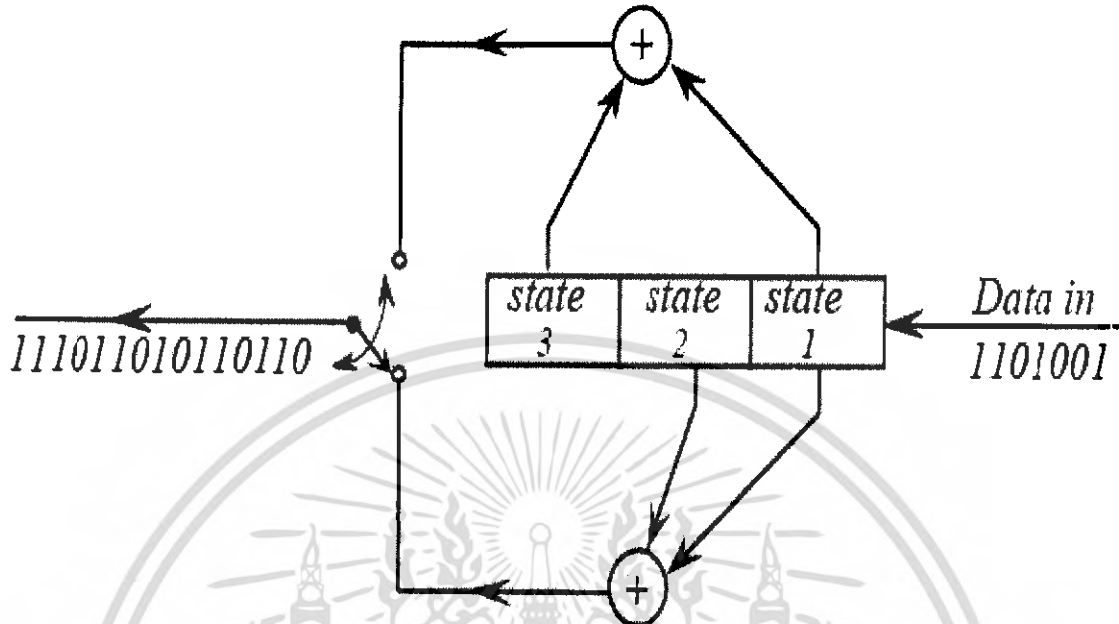


รูปที่ 2.14 การสร้างดิจิทัลคอนโวลูชันจาก shift register

ในการใช้งานทั่วไปมักจะส่งรหัสบิตเดียวจากบิตขาเข้า (input bit) หนึ่งบิต จากรูปที่ 2.14 ในขณะที่บิตขาเข้าถูกเลื่อนเข้ามาหนึ่งบิตกลุ่มของสวิตช์ที่สอดคล้องกับเซตของ h สร้างเป็นบิตขาออกบิตแรก จากนั้นจึงรีเซตสวิตช์เปลี่ยนกลุ่มสวิตช์ให้สอดคล้องกับเซตของ h จุดที่สองสร้างเป็นบิตขาออกบิตที่สองในกรณี เช่นนี้ บิตขาเข้าหนึ่งบิตถูกใช้ในการสร้างบิตขาออกสองบิตรหัสที่ได้ จะรู้จักในนาม “rate-1/2 convolutional code” และโดยทั่วไป rate-1/2 convolutional code ที่บิตขาออกบิตแรกมีค่าเหมือนกับบิตขาเข้าถูกเรียกว่า systematic code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง กรณี nonsystematic convolutional code ที่มี shift register 3 บิต มีเซตของ h ชุดแรก เป็น 101 และชุดที่สองเป็น 011 ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การสร้างรหัสคอนโวลูชันในตัวอย่าง

ผลลัพธ์จากปัญหาตัวอย่าง จะได้ลำดับบิตขาออกดังนี้

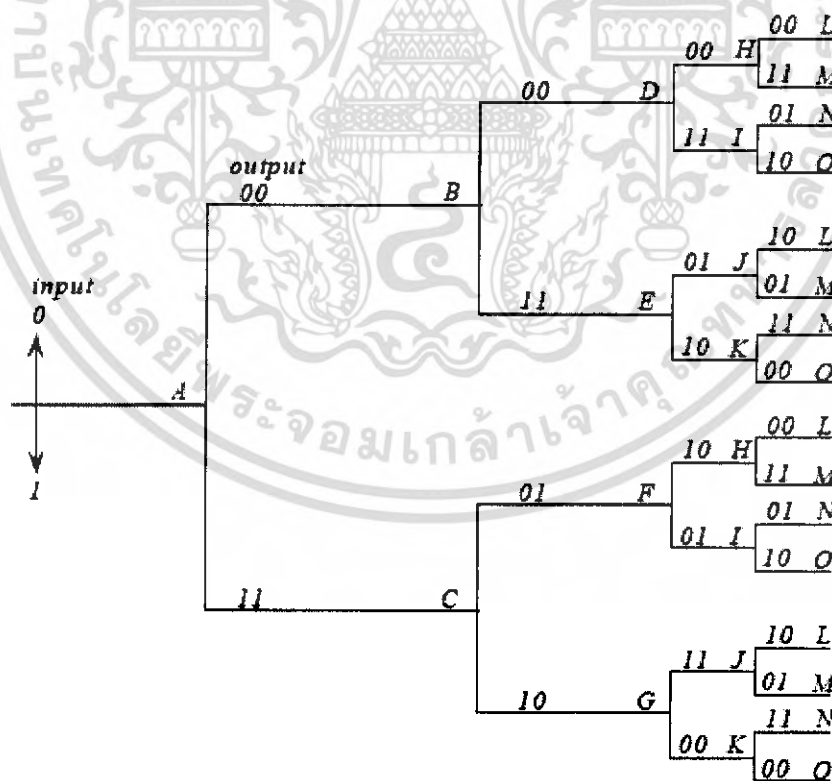
11101101011011000000...

การได้มาของผลลัพธ์นี้เกิดจากการพิจารณาว่าในเริ่มต้นคิดว่าบิตขาเข้าก่อนข้อความมีค่าเป็น '0' และบิตที่ตามหลังข้อความก็เป็น '0' เช่นกัน ขั้นตอนแรกเมื่อบิตแรกของข้อความเข้าสู่ state 1 สวิตช์บิดไปด้านบนที่เป็นกลุ่มของ h ตัวที่หนึ่ง ผลรวมเกิดจาก state 3 (เป็น '0' ในขณะนี้) รวมกับ state 1 (เป็น '1' ในขณะนี้) ได้ผลลัพธ์เป็นขาออกบิตแรกคือ '1' จากนั้นสวิตช์จะถูกบิดลงตำแหน่งล่างเพื่อต่อกับกลุ่มของ h ตัวที่สอง ผลรวมเกิดจาก state 2 (เป็น '0' ในขณะนี้) รวมกับ state 1 (เป็น '1' ในขณะนี้) ได้ ผลลัพธ์เป็นขาออกบิตที่สองคือ '1' ขั้นตอนที่สองเลื่อนบิตข้อความขาเข้าไปทางด้านซ้ายบิตแรกจะไปอยู่ใน state 2 บิตที่สองเข้ามาอยู่ state 1 หาผลรวมเช่นเดียวกับขั้นตอนที่หนึ่ง จากนั้นทำขั้นตอนต่อไปโดยการเลื่อนบิตข้อมูลต่อไป จนกระทั่งบิตสุดท้ายของข้อความผ่านออก จาก shift register

การหาผลลัพธ์ โดยการเลื่อนบิตผ่าน shift register ดังกล่าวเป็นวิธีทำให้สับสนได้ง่ายจึงได้เกิดวิธีการหา convolutional code อีกวิธีหนึ่ง ที่เรียกว่า วิธี 'ต้นไม้' (tree) ที่จะแสดงลำดับบิตขาออกที่เกิดจากลำดับบิตขาเข้าที่เป็นไปได้ทั้งหมด จะเห็นว่าเมื่อที่ความยาวของบิตข้อความขาเข้ามากขึ้น แผนภาพต้นไม้นี้จะแตกแขนงแยกออกเป็นสองทุกครั้งในแต่ละบิตข้อความเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม จำนวนของลำดับในแผนภาพนี้ จะถูกจำกัดด้วยจำนวนหน่วยความจำของ shift register ที่ใช้ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างรหัสขึ้นจากนั้นลำดับของบิตขาออกที่ ขึ้นอยู่กับบิตขาเข้าจะวนกลับซ้ำบนแผนภาพเดิมไม่ จำเป็นต้องเขียนแผนภาพยาวออกไป

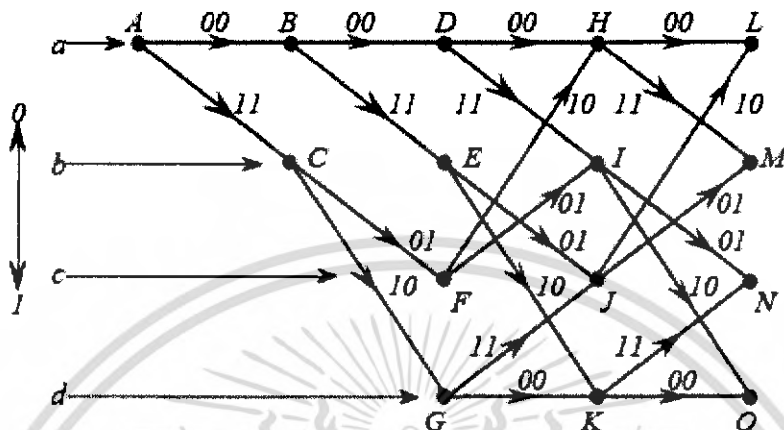
รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพต้นไม้สำหรับ convolutional code ของปัญหาตัวอย่างที่ผ่านมา เริ่มต้นจากจุด A เมื่อมีบิตข้อความขาเข้าเป็น '0' ก็จะเดินทางไปทางกิ่งด้านบนไปยังจุด B โดยให้รหัสขาออกเป็น '00' แต่ถ้า ณ จุด A มีบิตข้อความขาเข้าเป็น '1' จะไปทางกิ่งด้านล่างไปยังจุด C โดยให้รหัสขาออกเป็น '11' นั่นคือ ไม่ว่าจะอยู่ ณ จุดใดเมื่อมีบิตขาเข้าเป็น '0' จะแยกเส้นทางไปทางกิ่งด้านบน แต่ถ้าบิตขาเข้าเป็น '1' จะแยกเส้นทางไปทางกิ่งด้านล่างเสมอ พร้อมกับให้รหัสขาออกตามที่กำกับไว้บนกิ่งนั้น ตัวอย่าง ถ้าลำดับบิตข้อความขาเข้าเป็น 1101 ตามปัญหาตัวอย่างก่อนหน้านี้ เส้นทางเริ่มจากจุด A เนื่องจากบิตขาเข้าบิตแรกเป็น '1' จึงแยกไปทางจุด C ให้รหัสเป็น '11' จากจุด C บิตขาเข้าถัดมาคือ '1' จึงไปทางกิ่งล่างสู่จุด G ให้รหัสขาออก '10' แล้วจึงไปยังจุด J และ M ตามลำดับได้เป็นรหัสขาออกทั้งหมดเป็น 11101101 ได้เป็นส่วนหนึ่งของคำตอบทำนองเดียวกับในตัวอย่างที่ทำได้จากการพิจารณา shift register จากวิธีการนี้ อาจมีคำถามต่อไปว่าถ้ามีบิตขาเข้ามากขึ้นมีต้องต่อเส้นทางออกไปอีกหรือ คำตอบนั้น คือ ถ้าพิจารณาดู จะพบว่าหลังจากระดับที่สามของแผนภาพแล้วจะมีรูปแบบที่ซ้ำกัน จะเห็นว่าจุด H,I,J,K มีอย่างละสองจุดซ้ำกัน พิจารณาดู จะพบว่า จุด H คือ จุด D จุด I คือ จุด E จุด J คือ จุด F และ K คือ G นั่นเอง



รูปที่ 2.16 แผนภาพต้นไม้สำหรับรหัสคอนโวลูชันในปัญหาตัวอย่าง

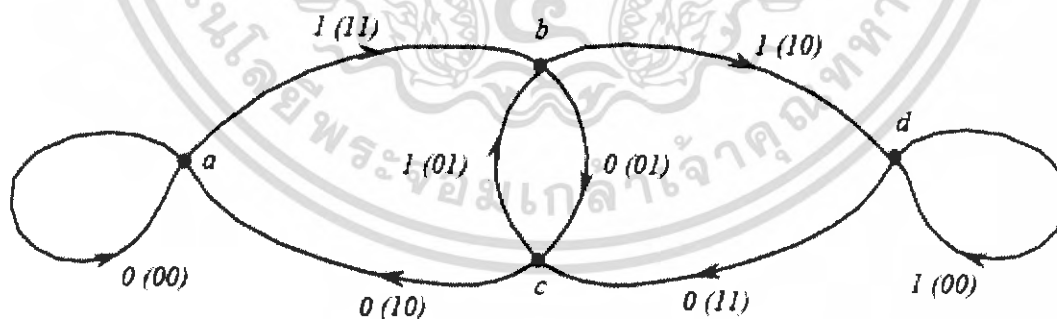
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวนกลับนี้ อาจเขียนเป็นโครงสร้างอีกรูปแบบหนึ่งที่รู้จักกันในนาม *Trellis* ได้ จะมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.17 จุดต่างๆ จะสอดคล้องกับแผนภาพต้นไม้ ในรูปที่ 2.16 แต่ละจุดจะมีทางออกแยกเป็นสองเส้นทางเมื่อมีบิตขาเข้าเป็น '0' จะแยกไปเส้นทางบนและถ้ามีบิตขาเข้าเป็น '1' จะแยกไปเส้นทางล่างเสมอ



รูปที่ 2.17 Trellis ในปัญหาตัวอย่าง

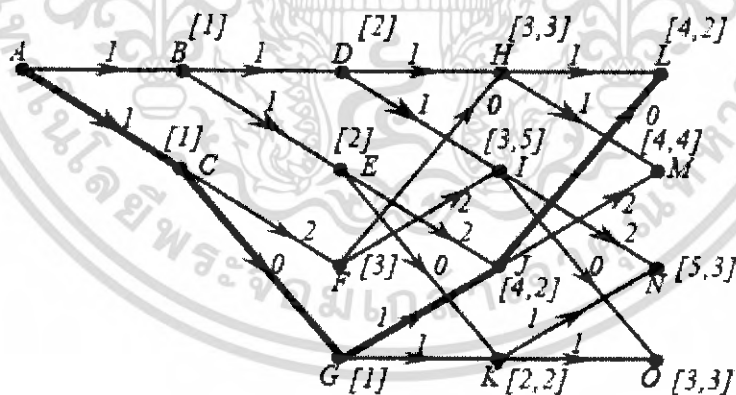
เป็นที่น่าสังเกตว่าจุดในแนวนอนของ *Trellis* นี้ จะให้รหัสที่เหมือนกันอาจคิดเป็นจุดเดียวกันได้ จะเห็นว่าเมื่อรวมจุดในแนวนอนแต่ละเส้นเป็นหนึ่งจุด จะได้ เป็นสี่จุดที่จะให้รหัสขาออกที่ แตกต่างกันเมื่อมีบิตขาเข้าที่เข้ามา อาจเรียกว่าเป็นสถานะที่แตกต่างกันสี่สถานะก็ได้ เมื่อเขียนเป็นไดอะแกรมของสถานะ (state diagram) จะได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 State diagram ในปัญหาตัวอย่าง

พิจารณาเริ่มจากจุดสถานะ *a* เมื่อบิตขาเข้าเป็น '1' จะเปลี่ยนสถานะเป็น *b* และให้รหัสขาออกเป็น 11 ในวงเล็บ แต่ถ้าบิตขาเข้าเป็น '0' จะไม่เปลี่ยนสถานะและให้รหัสขาออกเป็น '00' จากไดอะแกรมสถานะนี้จะทำให้การหารหัสเป็นไปได้ อย่างสะดวกและรวดเร็วการถอดรหัสของรหัสคอนวูลูชันนั้น จะไม่เหมือนกรณี รหัสที่เติมพาริตีบิตการถอดรหัสและแก้ไขข้อผิดพลาดจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปโดยอัตโนมัติ โดยการใช้เทคนิคที่ เรียกว่า *Viterbi algorithm* จะกล่าวไปแล้ววิธีการนี้ ก็คือ การเปรียบเทียบลำดับบิตที่รับได้ กับลำดับบิตของการเข้ารหัสที่เป็นไปได้ทั้งหมด และเลือกลำดับที่ ใกล้เคียงที่สุด วิธีการทำโดยการพิจารณาจาก trellis สมมุติว่าลำดับบิตที่รับได้เป็น '10101010' ในการถอดรหัสจะเริ่มจากการวาด trellis ใหม่ แสดงระยะห่างหรือความแตกต่างระหว่างคู่ของบิตที่รับ ได้กับคู่บิตขาออกของ trellis ในเส้นทางนั้น ในรูปที่ 2.19 เริ่มที่ จุด A คู่ บิตที่รับได้คู่แรกจากการ สมมุติ คือ '10' เมื่อเปรียบเทียบกับบิตขาออกของเส้นทาง AB ในรูปที่ 2.17 คือ 00 ระยะห่างของบิต เท่ากับ 1 ให้เขียนไว้บนเส้นทางนั้น และจากจุด A ถ้าเปรียบเทียบกับเส้นทาง AC จะมีระยะห่างบิต เท่ากับ 1 เช่นกัน เมื่อมาถึงจุด B หรือ C ก็พิจารณาคู่บิตที่รับได้คู่ที่สองเทียบกับเส้นทางจาก B หรือ C ต่อไป พิจารณาต่อจาก B ไปทาง D หรือ E จะมีระยะห่างเท่ากับ '1' เหมือนกัน แต่จาก C ไป F มี ระยะห่างของบิตเท่ากับ 2 ในขณะที่จาก C ไปทาง G มีระยะห่างเท่ากับศูนย์ คือ ลำดับบิตเหมือนกัน เลย ทำเช่นนี้ ต่อไปจนครบทุกเส้นทาง ค่าระยะห่างของบิตสะสม คือ ค่าระยะห่างรวมจากจุด A ไป ยังจุดใดๆ แสดงในวงเล็บ วงเล็บที่มีสองค่า หมายถึง การเดินทางมายังจุดนี้ มีสองเส้นทางและแต่ละเส้นทางมีระยะห่างของบิตสะสมแตกต่างกัน ให้เลือกเส้นทางที่มีระยะห่างของบิตสะสมน้อยที่สุด ในรูปเลือกเส้นทาง ACGJL (เส้นทึบในรูป) โดยมีค่าระยะห่างสะสมเท่ากับ 2 จากเส้นทางที่ได้ ย้อนกลับไปหาบิตข้อความขาเข้าที่ทำให้เกิดเส้นทางนี้ คือ '1100' และรหัสขาออกที่ควรจะเป็น คือ 11101110 เมื่อเปรียบกับสิ่งที่รับได้ คือ 10101010 เห็นว่า ผิดไปสองบิต แต่รหัสนี้ก็สามารถแก้ไข ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้

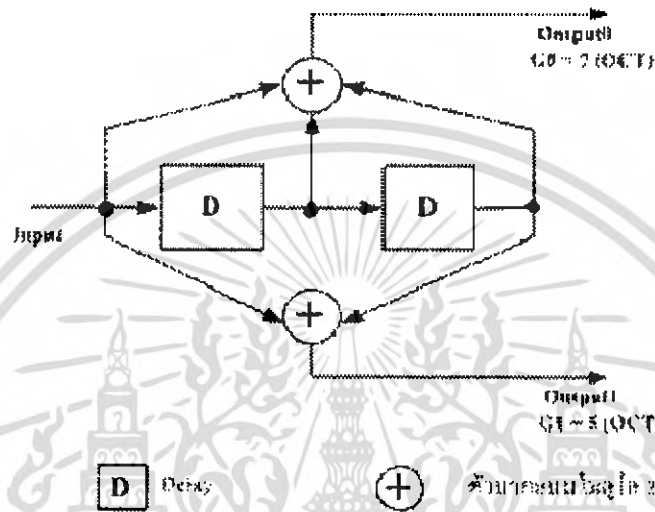


รูปที่ 2.19 Viterbi algorithm สำหรับรหัสคอนโวลูชันในปัญหาตัวอย่าง

การทำงานของ การเข้ารหัส Convolution นั้น ข้อมูลอินพุต (k) จะถูกส่งเข้าอินพุตของวงจรเข้ารหัสแบบต่อเนื่อง โดยข้อมูลเอาต์พุตของการเข้ารหัส (n) เกิดจากการนำข้อมูลอินพุต (k) และข้อมูลใน Shift Register มาบวกแบบมอดูโล 2 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Constraint Length (K) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงจำนวนของข้อมูลอินพุต (k) และข้อมูลสูงสุดใน Shift Register ที่นำมาบวกแบบมอดูโล 2 ในการหาค่าเอาต์พุต และค่า Generator Polynomial (g) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงตำแหน่งข้อมูลอินพุตและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลใน Shift Register ที่นำมาบวกแบบมอดุโล 2 ค่า Generator Polynomial นี้เขียนใน รูปแบบเลขฐานแปด ส่วนค่าอัตราเข้ารหัส (R) เป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลอินพุต (k) ต่อ จำนวนเอาต์พุต (n) หรือ k/n วงจรตัวอย่างการเข้ารหัส Convolution แสดงในรูปที่ 2 มีค่าอัตราส่วน ของการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ ค่า Constraint Length เท่ากับ 3 และมีค่า Generator Polynomials g_0 เท่ากับ 7_8 และ g_1 เท่ากับ 5_8



รูปที่ 2.20 วงจรเข้ารหัส Convolution ที่ค่า R เท่ากับ $1/2$ และค่า K เท่ากับ 9

2.12 อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (MAP Decoding Algorithm)

อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (Maximum a posteriori probability, MAP) algorithm ใช้เกณฑ์การถอดรหัสที่ลดความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตให้น้อยที่สุด แต่อัลกอริทึม Viterbi นั้นจะลดความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตที่จะเกิดกับลำดับข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด อัลกอริทึม MAP มีการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่าอัลกอริทึม Viterbi และจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับค่าแปรปรวนของสัญญาณรบกวนด้วย อย่างไรก็ตาม MAP จะพิจารณาเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ใน trellis ซึ่งไม่เหมือนกับอัลกอริทึม Soft output Viterbi (SOVA) ที่พิจารณาแค่เพียงเส้นทาง ML และ SC จึงถือเป็นข้อได้เปรียบข้อสำคัญของอัลกอริทึม MAP สำหรับอัลกอริทึมการถอดรหัสที่มีการวนลูบ

เครื่องถอดรหัสแบบ Soft-output MAP คำนวณอัตรา a posteriori log-likelihood สำหรับบิตข้อมูล u , เป็น

$$\Lambda(u_r) = \log \frac{P\{u_r = 1 | r\}}{P\{u_r = 0 | r\}}, \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $P\{u_i = i | r\}, i=0,1$ เป็น a posteriori probability (APP) ของบิตข้อมูล u_i ตัวถอดรหัสจะต้องตัดสินใจโดยเปรียบเทียบ $\Lambda(u_i)$ กับศูนย์

$$u_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \Lambda(u_i) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.10)$$

APPs ในสมการ สามารถนำมาคำนวณหาค่าได้จาก trellis diagram โดย

$$P\{u_i = 0 | r\} = \sum_{(m',m) \in B_i^0} P\{S_{i-1} = m', S_i = m | r\}, \quad (2.11)$$

$$P\{u_i = 1 | r\} = \sum_{(m',m) \in B_i^1} P\{S_{i-1} = m', S_i = m | r\}, \quad (2.12)$$

โดยที่ S_{i-1} และ S_i เป็นสถานะของตัวเข้ารหัส ณ เวลาที่ $i-1$ และ i ตามลำดับ และ B_i^0 และ B_i^1 เป็นเซตของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ m' ถึงสถานะ m ที่เกิดจาก $u_i = 0$ และ $u_i = 1$ ตามลำดับ สมการที่ และ สามารถเขียนได้เป็น

$$P\{u_i = 0 | r\} = \sum_{(m',m) \in B_i^0} \frac{P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r\}}{P\{r\}}, \quad (2.13)$$

$$P\{u_i = 1 | r\} = \sum_{(m',m) \in B_i^1} \frac{P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r_i^N\}}{P\{r\}}, \quad (2.14)$$

โดยที่ $P\{r\}$ เป็นค่าคงที่ เนื่องจากมันไม่มีผลกระทบต่อการทำให้มีค่ามากที่สุดและจะไม่นำไปพิจารณาในการคำนวณค่าต่อไป

เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณค่าบิตข้อมูล APPs ฟังก์ชันความน่าจะเป็นต่อไปนี้ได้มีการอธิบายไว้

$$\alpha_i(m) = P\{S_i = m, r_i^N\}, \quad (2.15)$$

$$\beta_i(m) = P\{r_{i+1}^N | S_i = m\}, \quad (2.16)$$

$$\gamma_i^j(m', m) = P\{u_i = j, S_i = m, r_i, S_{i-1} = m'\}, \quad (2.17)$$

โดยที่

$$r_i = (r_{i,0}, \dots, r_{i,j}, \dots, r_{i,n-1}), \quad (2.18)$$

$$r_i^k = (r_i, r_{i+1}, \dots, r_k), \quad (2.19)$$

ความน่าจะเป็นร่วมของการเปลี่ยนสถานะ $P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r\}$, อธิบายได้เป็น

$$P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r\} = \alpha_{i-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_i'(m', m) \beta_i(m), \quad (2.20)$$

โดยที่ $\alpha_i(m)$ และ $\beta_i(m)$ ได้มาจาก

$$\alpha_i(m) = \sum_{m'} \alpha_{i-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_i'(m', m), \quad (2.21)$$

$$\beta_i(m) = \sum_{m'} \beta_{i+1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_i'(m', m), \quad (2.22)$$

และ $\gamma_i'(m', m)$ — เป็นค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะของช่องสัญญาณล่วงหน้าหนึ่งด้วยบิตข้อมูล APP $p_i(u_i = i), i = 0, 1$ เมื่อ u_i เป็นสัญลักษณ์ของข้อมูลที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเปลี่ยนสถานะ $S_{i-1} = m' \rightarrow S_i = m$ สัมประสิทธิ์ $\gamma_i'(m', m)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\gamma_i'(m', m) = p_i(u_i = i) \prod_{j=0}^{j=n-1} P\{r_{i,j} | x_{i,j}\} \quad (2.23)$$

$$P\{r_{i,j} | x_{i,j}\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(r_{i,j} - x_{i,j})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.24)$$

โดยที่ $x_{i,j}, j = 0, \dots, n-1$ เป็นสัญลักษณ์ข้อมูลที่มีอคูเลทโดย BPSK ในคำรหัสที่ร่วมกับการเปลี่ยนแปลง $S_{i-1} = m' \rightarrow S_i = m$

ถ้าเราสมมติให้ตัวเข้ารหัส (Encoder) เริ่มต้นและจบลงที่สถานะศูนย์ ขอบเขตของเงื่อนไขจะเป็น

$$\alpha_0(0) = 1, \alpha_0(m) = 0 \text{ for } m \neq 0, \quad (2.25)$$

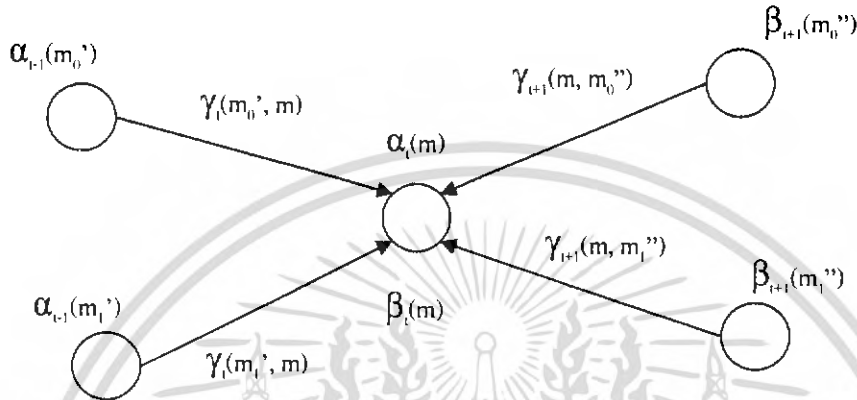
$$\beta_N(0) = 1, \beta_N(m) = 0 \text{ for } m \neq 0, \quad (2.26)$$

ตอนนี้อัตรา log-likelihood $\Lambda(u_i)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{\sum_{(m',m) \in B^1} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i'(m', m) \beta_i(m)}{\sum_{(m',m) \in B^0} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i^0(m', m) \beta_i(m)} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมข้างต้นนี้ โดยปกติแล้วจัดอยู่ในกลุ่มอัลกอริทึมไปข้างหน้าและไปข้างหลัง (forward/backward algorithm) เนื่องจากสัมประสิทธิ์ $\alpha_i(m)$ สามารถวนลูปคำนวณหาได้ตั้งแต่ตอนเริ่มต้น trellis (forward recursion) และตัวสัมประสิทธิ์ $\beta_i(m)$ ก็สามารถวนลูปคำนวณได้ตอนท้ายของ trellis (backward recursion)



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการวนลูปไปข้างหน้าและไปข้างหลัง

รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพที่นำเสนอเรื่อง forward/backward recursion สัมประสิทธิ์ $\alpha_{i-1}(m_i')$ แสดงถึง α coefficient สำหรับสถานะ m_i' ในสถานะที่ $(t-1)$ th ซึ่งเชื่อมต่อกับสถานะ m ในสถานะ trellis และที่การเปลี่ยนแปลงสถานะ $S_{t-1} = m_i' \rightarrow S_t = m$ ที่มีสาเหตุจากบิตข้อมูล $u_t = i, i = 0, 1$ ในทำนองเดียวกัน $\beta_{i+1}(m_i'')$ แสดงถึงสัมประสิทธิ์ β ที่แสดงถึงสถานะ m_i'' ในสถานะ $(t+1)$ th trellis ที่ซึ่งเชื่อมต่อกับสถานะ m ในสถานะ t th trellis และที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ $S_t = m \rightarrow S_{t+1} = m_i''$ ที่เกิดจากบิตข้อมูล $u_t = i, i = 0, 1$ ค่า APP ของบิตข้อมูลสามารถคำนวณได้จาก

$$P\{u_t = 1 | r\} = \frac{e^{\Lambda(u_t)}}{1 + e^{\Lambda(u_t)}}, \quad (2.28)$$

$$P\{u_t = 0 | r\} = \frac{1}{1 + e^{\Lambda(u_t)}}, \quad (2.29)$$

ค่า APP ของบิตข้อมูลที่ถูกส่งออกไปสามารถคำนวณได้โดยบวกค่าความน่าจะเป็นของคำรหัสที่ประกอบด้วยบิตที่ถูกส่ง โดยเฉพาะ นั่นก็คือ

$$P\{x_{t,j} = 1 | r\} = \sum_{u_t = i, x_{t,j} = 1} P\{u_t = i | r\}, \quad (2.30)$$

$$P\{x_{t,j} = -1 | r\} = \sum_{u_t = i, x_{t,j} = -1} P\{u_t = i | r\}, \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 Forward error correction (FEC)

2.13.1 Error control

ในการสื่อสารข้อมูล error จะเกิดขึ้นได้เสมอ ไม่ว่าจะใช้อุปกรณ์สื่อสารที่ดีเพียงใดข้อมูลที่ส่งสามารถเสียหายได้ในระหว่างการส่งข้อมูล สำหรับระบบที่น่าเชื่อถือ จะต้องมีการป้องกัน error มีการตรวจสอบและแก้ไขที่ผิดพลาด

สาเหตุของ error

- white noise หรือเรียกว่า thermal noise หรือ gaussian noise เป็นสัญญาณรบกวนจากความร้อน ที่เกิดจากการเคลื่อนย้าย electron
- Impulse noise หรือเรียกว่า spike noise เป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่สามารถคาดเดาได้ เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดจากรอยข่วนบน CD เป็นต้น
- Crosstalk เป็นผลกระทบที่เกิดจากอุปกรณ์หนึ่งไปรบกวนกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น เสาอากาศ เป็นต้น
- Echo เกิดจากอุปกรณ์หรือสายส่งสัญญาณ ไม่ได้รับการออกแบบมาดีพอ สายส่งสัญญาณไม่มีตัวปิดท้าย (terminator) เป็นต้น
- Jitter เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ เมื่อมันเข้าใกล้อุปกรณ์ electronic
- Attenuation เมื่อมีการส่งข้อมูลไปในที่ไกลๆ สัญญาณอาจจะค่อยๆ ทำให้ปลายทางรับข้อมูลไม่ได้ ต้องมี repeater เพื่อเพิ่มกำลังสัญญาณ
- Distortion เกิดจากคลื่นสัญญาณเดินทางด้วยความเร็วที่ต่างกัน และเวลาที่ต่างกันเมื่อผู้รับผสมคลื่นสัญญาณ ผลที่ได้อาจไม่เหมือนกับที่ผู้ส่งส่งมา

ประเภทของ error

1. single - bit error คือ error ที่เกิดขึ้นเพียง bit สำหรับข้อมูลหนึ่งๆ
2. burst error คือ error ที่เกิดขึ้น 2 bits หรือมากกว่า

2.13.2 Error detection

การตรวจสอบ redundancy จะมีอยู่ในชั้น data link layer มี 3 ชนิด

- vertical redundancy check [VRC] จะใส่ parity bit ไปทุกๆ data unit
- longitudinal redundancy check [LRC] จะสร้าง parity 8 parity bit จากข้อมูลเดิม แล้วนำไปใส่รวมกับข้อมูลเดิมแล้วส่งไปให้ผู้รับ
- cyclic redundancy check [CRC] เป็นตัวเช็คที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีการจะไม่เหมือนกับ VRC และ LRC แต่จะใช้วิธีการเรียงลำดับของ redundant bits CRC เรียกอีกอย่างว่า CRC remainder โดยจะส่งไว้ที่ตอนท้ายสุดของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.3 Error Correction

Error Correction มีความหมายคือ กลไกการแก้ความผิดพลาดของข้อมูล กล่าวคือ ผู้รับจะพยายามแก้ไขความผิดพลาดนั้นด้วยตัวเอง ซึ่งเทคนิคนั้นเรียกว่า Forward Error Correction (FEC) ซึ่งหากไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดนั้นๆ ได้ ก็อาจจะนำวิธี Auto-matic ReQuest-repeat (ARQ) มาใช้ได้ เพื่อร้องขอให้ผู้ส่งฯ เปรณข้อมูลนั้นมาใหม่อีกครั้ง และ เช่นเดียวกันผู้ส่ง และ ผู้รับจะต้องตกลงกันก่อนว่าจะใช้วิธีใด เช่น Hamming Code , BCH เป็นต้น

เมื่อได้รับข้อมูลฝั่งผู้รับจะมี 3 ทางเลือกกว่าจะให้ส่งข้อมูลมาใหม่หรือไม่

1. มีเวลาพอหรือไม่สำหรับการที่จะให้ผู้ส่งส่งข้อมูลมาใหม่
2. ถ้าข้อมูลเสียหายทั้งหมดจำเป็นที่จะต้องให้ส่งมาใหม่หรือไม่
3. ถ้าข้อมูลเสียหายเพียงบางส่วนจำเป็นที่จะต้องให้ส่งใหม่หรือไม่

2.13.3.1 Error correction using retransmission

ถ้าผู้ส่งไม่ได้รับ ACK ก็จะทำการส่ง frame ไปใหม่ โดยการที่จะตัดสินใจส่ง frame ใหม่หรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับ

1. Frame เสียหาย ฝั่งผู้รับส่ง negative ACK หรือ ผู้ส่งไม่ได้รับ ACK
2. Frame สูญหาย
3. ACK สูญหาย

2.13.3.2 Stop – and – wait automatic repeat request [ARQ]

เมื่อผู้ส่งส่ง frame ข้อมูลไปให้ผู้รับ ฝั่งผู้ส่งจะทำการรอนกว่า จะได้รับ ACK จากฝั่งผู้รับ ถ้าไม่ได้รับ ACK ในเวลาที่กำหนดผู้ส่งจะทำการส่ง frame นั้นกลับไปให้ผู้รับใหม่อีกครั้งแต่ถ้ารับ ACK ในเวลาที่กำหนดผู้ส่งจะส่ง frame ข้อมูลถัดไปที่เราเรียกว่า stop-and – wait- ARQ

2.13.3.3 Sliding Window ARQ

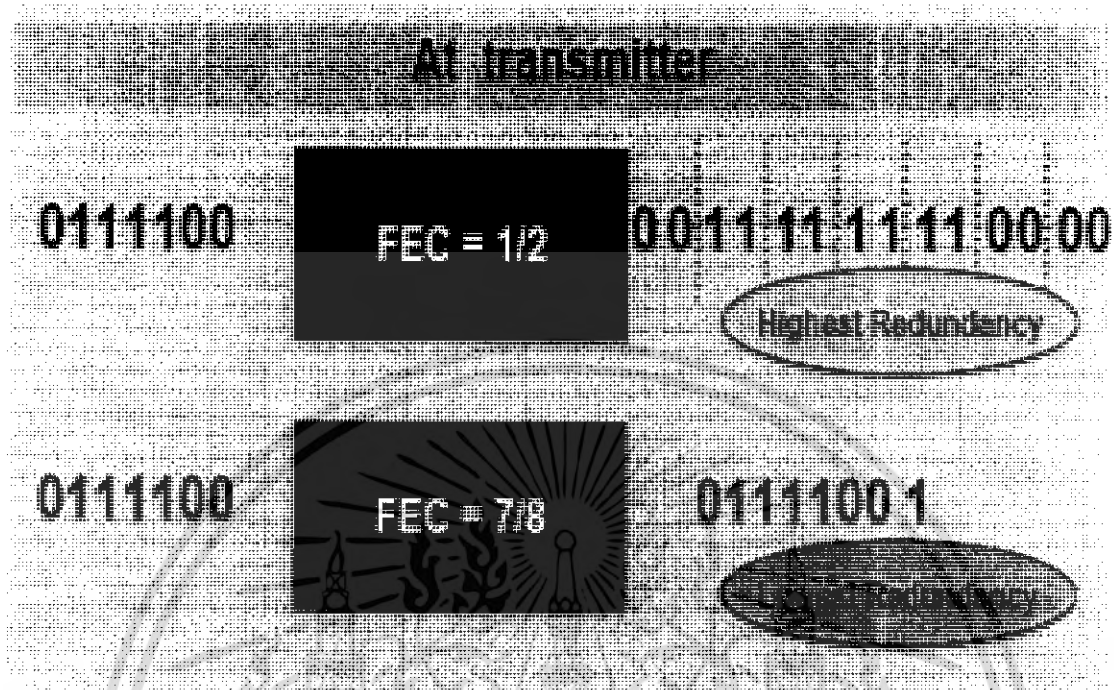
Stop- and- wait ARQ เป็นวิธีที่ช้ามากเพราะผู้ส่งต้องรอ ACK จากฝั่งผู้รับก่อนจึงจะส่ง Frame ต่อไปได้ แต่ถ้า Sliding- window จะสามารถส่ง frame ข้อมูลไปได้เรื่อยๆจนกว่าผู้ส่งจะได้รับ NAK จากฝั่งผู้รับ จึงทำการส่งข้อมูลที่เสียหายไปใหม่

2.13.4 Forward Error Correction (FEC)

ถ้าข้อมูลที่ส่งเสียหายเพียงเล็กน้อย เช่น กลายเป็น 1 ก็สามารถส่งต่อผู้รับได้โดยไม่ต้องร้องขอให้ผู้ส่งส่งข้อมูลมาใหม่ เพราะทางฝั่งผู้รับสามารถแก้ไขข้อมูลให้ถูกต้องถ้ารู้ว่าข้อมูล bit ไหนที่เสียหายระหว่างการส่งข้อมูล

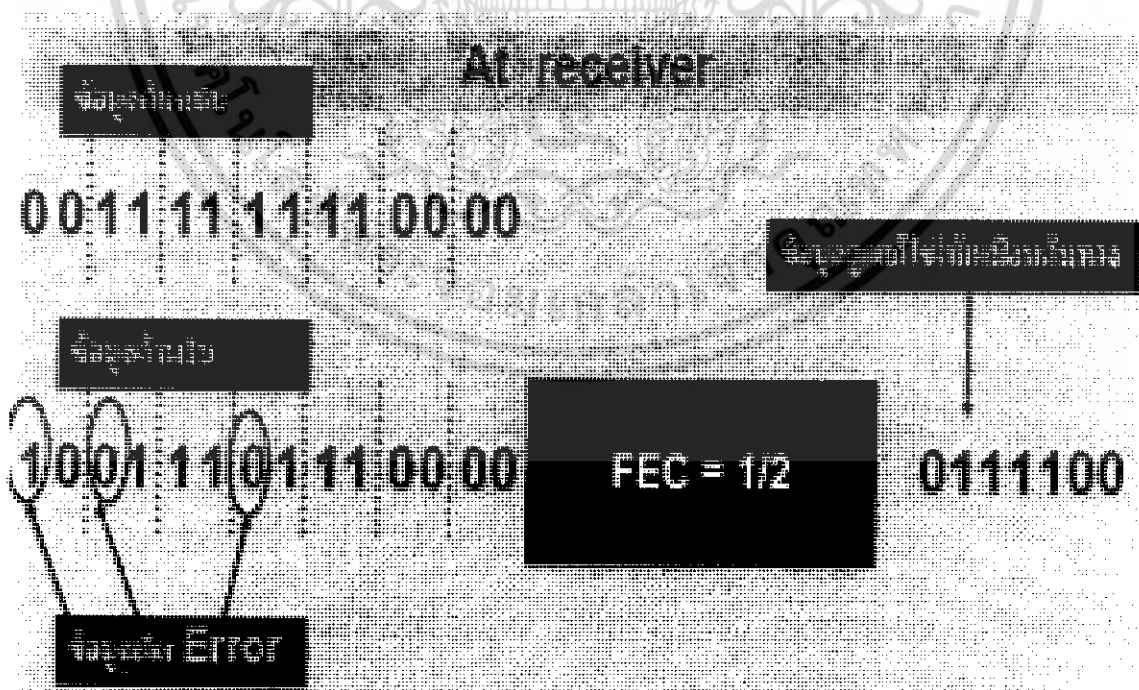
- เปรียบเทียบ FEC = 1/2 และ FEC = 7/8

ที่ฝั่งภาคส่ง



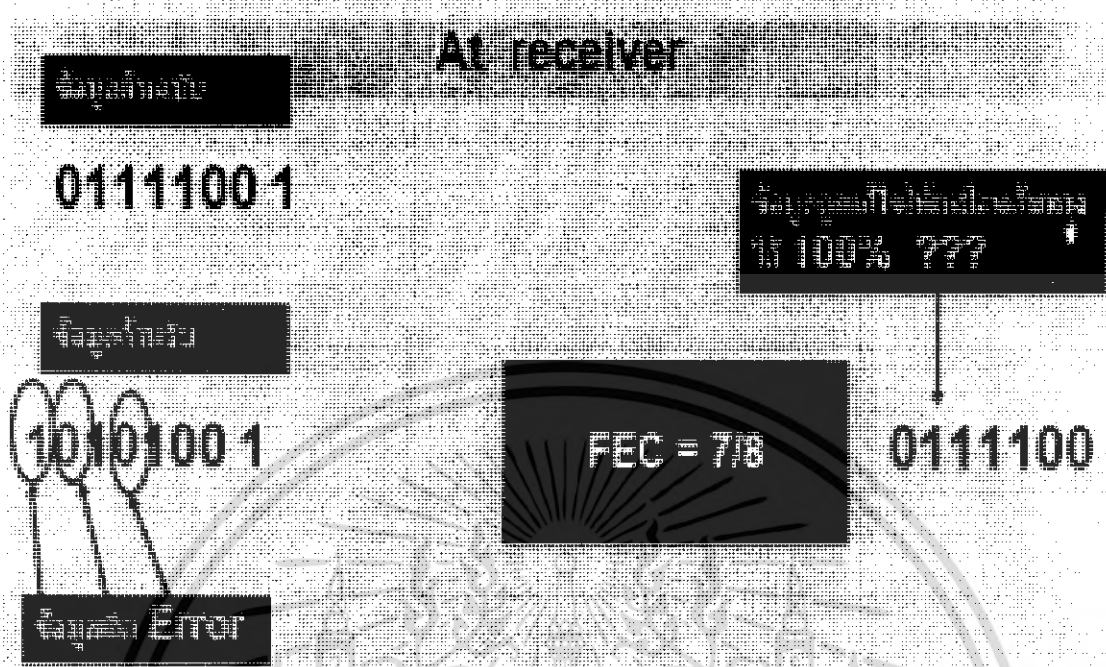
รูปที่ 2.22 รูปตัวอย่างการเข้ารหัสแบบ FEC = 1/2 และ FEC = 7/8 ที่ภาคส่ง

ที่ฝั่งภาครับ



รูปที่ 2.23 รูปตัวอย่างการถอดรหัสแบบ FEC = 1/2 ที่ภาครับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 รูปตัวอย่างการถอดรหัสแบบ FEC = 7/8 ที่ภาครับสัญญาณ

Info rate : FEC = 1/2 และ FEC = 7/8

$$\text{Info rate (\%)} = \frac{\text{Bit จำนวนข้อมูล}}{\text{Bit ทั้งหมด}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Info rate (%) at different code rates

FEC	Info rate (%)
1/2	50.00 Minimum Info Rate
2/3	66.67
3/4	75.00
5/6	83.33
7/8	87.50 Maximum Info Rate

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดง Info rate ของ code rates ที่ต่างกัน

2.13.4.1 ตัวอย่างรหัสแก้ไขข้อผิดพลาดล่วงหน้า (FEC)

- **รหัสแบบบล็อก (Block Code)**

รหัสแบบบล็อก (Block Code) เป็นหนึ่งในรหัสที่ใช้ป้องกันความผิดพลาดล่วงหน้า (FEC) ซึ่งในการเข้ารหัสแบบ บล็อก นั้น ข้อมูลข่าวสารจะถูกแบ่งออกเป็นชุดหรือ บล็อก ย่อยๆ ก่อนการเข้ารหัส ซึ่งรหัส แบบ บล็อกสามารถตรวจสอบและบอกตำแหน่งข้อมูลที่ผิดพลาดได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการเข้ารหัส รหัส แบบ บล็อกนี้มีหลายรูปแบบ เช่น รหัสแบบลิเนียร์บล็อก (Linear Block Code) รหัสแบบแฮมมิง รหัสแบบ Cyclic และรหัสแบบ BCH เป็นต้น

- **การเข้ารหัสแบบลิเนียร์บล็อก (Linear Block Code)**

การเข้ารหัสแบบลิเนียร์บล็อกนั้นเป็นพื้นฐานที่สำคัญของรหัสแบบบล็อก รหัสแบบลิเนียร์บล็อกเป็นการตรวจเช็คพาริตี (Parity) ชนิดหนึ่ง โดยการเข้ารหัสแบบลิเนียร์บล็อกนั้นเป็นการนำข้อมูลข่าวสารที่ต้องการเข้ารหัสมาแบ่งเป็นชุดๆ หรือบล็อกย่อยๆ ซึ่งแต่ละชุดนั้นมีขนาดเท่ากับ k บิต แล้วนำมาหาค่าคำรหัสหรือ Codeword ขนาด n บิต โดยทั่วไปแทนด้วยสัญลักษณ์ (n, k) การเข้ารหัสแบบลิเนียร์บล็อกนั้นการคำนวณหาค่าคำรหัสเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) ซึ่งการหาค่าคำรหัสจะใช้ Generator matrix ในการคำนวณ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = mG \quad (2.32)$$

โดย U คือ ข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัส m คือ ชุดของข้อมูลจำนวน k บิต ซึ่งนำมาเข้ารหัส และ G คือ Generator matrix ของการเข้ารหัส

- การถอดรหัสแบบลิเนียร์บล็อก

การตรวจจับความผิดพลาดของข้อมูลที่ถูกส่งไปของรหัสแบบบล็อกนั้น วิธีการคือการนำข้อมูลที่รับได้มาทำการคูณกับเมตริกที่ใช้สำหรับตรวจจับความผิดพลาดของข้อมูล (H) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคูณนั้นเรียกว่าค่า Syndrome (S) ซึ่งเป็นค่าแสดงถึงลักษณะความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดขึ้นกับข้อมูลชุดนั้นๆ [Imai ,1990] ค่า Syndrome ทำให้สามารถนำไปใช้แก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลให้ถูกต้องได้ โดยลักษณะการถอดรหัสแบบลิเนียร์บล็อกมีการทำงานดังสมการ

$$S = (U + e)H^T \quad (2.33)$$

โดย e คือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น และ H จะมีความสัมพันธ์กับ G ซึ่งทำให้ UH^T มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่า Syndrome ที่ได้นั้นมีค่าเท่ากับ

$$S = eH^T \quad (2.34)$$

ค่า Syndrome ที่ได้จากการคำนวณนั้นใช้ในการตรวจสอบว่ามีการผิดพลาดเกิดขึ้นที่บิตใด ทำให้สามารถทำการแก้ไขข้อมูลให้เกิดความผิดพลาดให้ถูกต้องได้ แต่รหัสแบบลิเนียร์บล็อกนั้นมีข้อจำกัดในการตรวจสอบหาตำแหน่งผิดพลาดถ้าความผิดพลาดเกิดขึ้นนั้นเกินขอบเขตของรหัส

2.13.5 ความสามารถในการตรวจจับและแก้ไขความผิดพลาด

ความสามารถในการตรวจจับและแก้ไขความผิดพลาด เป็นตัวบอกระสิทธิภาพของรหัส การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของการเข้ารหัสต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบหลายส่วน ได้แก่ น้ำหนักแฮมมิง (Hamming weight) และระยะห่างแฮมมิง (Hamming distance) สำหรับค่าน้ำหนักแฮมมิงหรือ $w(U)$ นั้นหมายถึงจำนวนบิตของข้อมูลที่ไม่เท่ากับ “0” ซึ่งในกรณีของข้อมูลไบนารี หมายถึงจำนวนข้อมูลที่เป็น “1” สำหรับค่าระยะห่างแฮมมิงระหว่างข้อมูล U และ V หรือ $d(U, V)$ นั้นหมายถึงจำนวนบิตของข้อมูลทั้งสองที่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งทั้งสองค่านี้มีความสัมพันธ์กันดังสมการ [Imai ,1990]

$$d(U, V) = \sum_{i=1}^n U_i \oplus V_i \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ผ่านมาการเข้ารหัสนั้นค่าระยะห่างแฮมมิงที่อาจเท่ากันหรือแตกต่างกันก็ได้ แต่ในการวิเคราะห์การทำงานจะพิจารณาเพียงข้อมูลที่มีค่าระยะห่างแฮมมิงที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเรียกว่าค่าระยะห่างแฮมมิงต่ำสุด (Minimum hamming distance) หรือ โดย จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล สำหรับการเข้ารหัสแบบบล็อกนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{min} และจำนวนบิตที่มากที่สุดของข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดที่ยังสามารถแก้ไขให้ถูกต้องได้ () แสดงดังสมการ

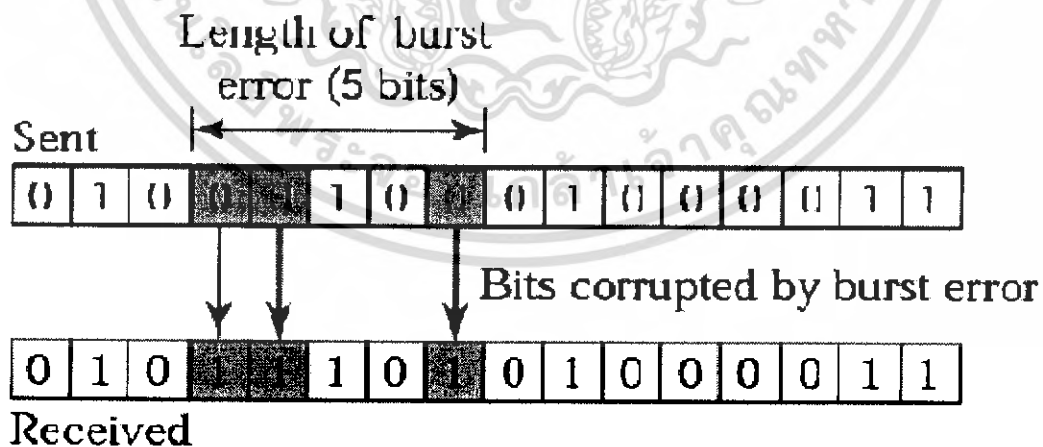
$$t = \left\lfloor \frac{d_{min} - 1}{2} \right\rfloor \quad (2.36)$$

ส่วนค่าของจำนวนบิตที่มากที่สุดของข้อมูลที่ยังสามารถตรวจจับได้ว่าเกิดความผิดพลาดขึ้น (Error detecting capability) นั้นแสดงดังสมการ

$$e = d_{min} - 1 \quad (2.37)$$

2.14 Burst Error

หมายถึง การผิดพลาดที่เกิดขึ้นตั้งแต่ 2 บิตขึ้นไป ต่อหน่วยข้อมูล 1 หน่วย (เช่น Byte, Character, Data Unit, หรือ Packet) จากตัวอย่าง สังเกตว่า Error ชนิดนี้ ไม่จำเป็นต้องเกิดกับบิตที่ติดกัน ความยาวของ Error วัดได้จาก บิตแรก จนถึงบิตสุดท้าย ที่เกิดข้อผิดพลาด โดยที่ข้อมูลบางบิตในช่วงนั้นอาจถูกต้องก็ได้ จำนวนบิตที่อาจเกิด Error ขึ้นกับช่วงเวลาของ Noise



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการเกิด Burst Error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 Equalization

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในการสื่อสารแบบไร้สาย โดย equalization เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลด BER(Bit Error Rate)ของสัญญาณที่เกิดจาก ISI (Intersymbol Interference) ที่เกิดขึ้นจากการส่งสัญญาณแบบ multipath ในช่องสัญญาณแบบ time dispersive channel

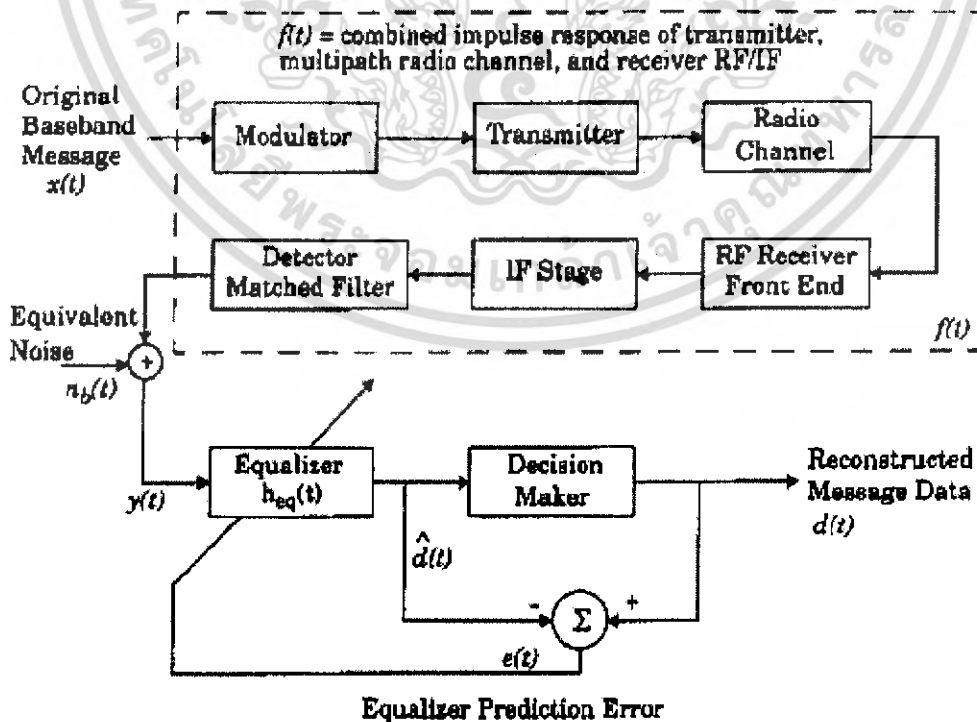
2.15.1 คุณสมบัติของ equalization

- โครงสร้างของ filter แบบ inverse จะมีความซับซ้อน
- ไม่จำเป็นที่จะต้องทราบโครงสร้างของช่องสัญญาณแบบ multipath เสมอไป
- ช่องสัญญาณแบบ multipath จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้น ตัว

equalization จะต้องเป็นแบบสามารถปรับค่าเองได้ตามการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ

2.15.2 รูปแบบการทำงานของ equalization มีอยู่ 2 รูปแบบ

- Training mode จะทำงานโดยการสุ่มค่าที่ไม่ซ้ำกันแล้วส่งสัญญาณที่ทราบค่าไปยังภาครับ ซึ่งอาจจะได้รับค่าที่ไม่เหมือนเดิม แล้วมาเทียบกับต้นฉบับของช่องสัญญาณแล้วดูว่าเกิดความเปลี่ยนแปลงว่าเป็นอย่างไร โดยต้องส่งสลับกันระหว่าง Training และ Tracking ทำให้ทางฝั่งภาครับทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ
- Tracking mode เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่า estimate filter coefficient แล้วนำค่าที่ได้มาปรับสัญญาณให้ได้ตรงกับสัญญาณต้นฉบับมากที่สุด



รูปที่ 2.26 Block diagram ของระบบการสื่อสารอย่างง่ายโดยใช้ adaptive equalizer ที่ฝั่งภาครับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

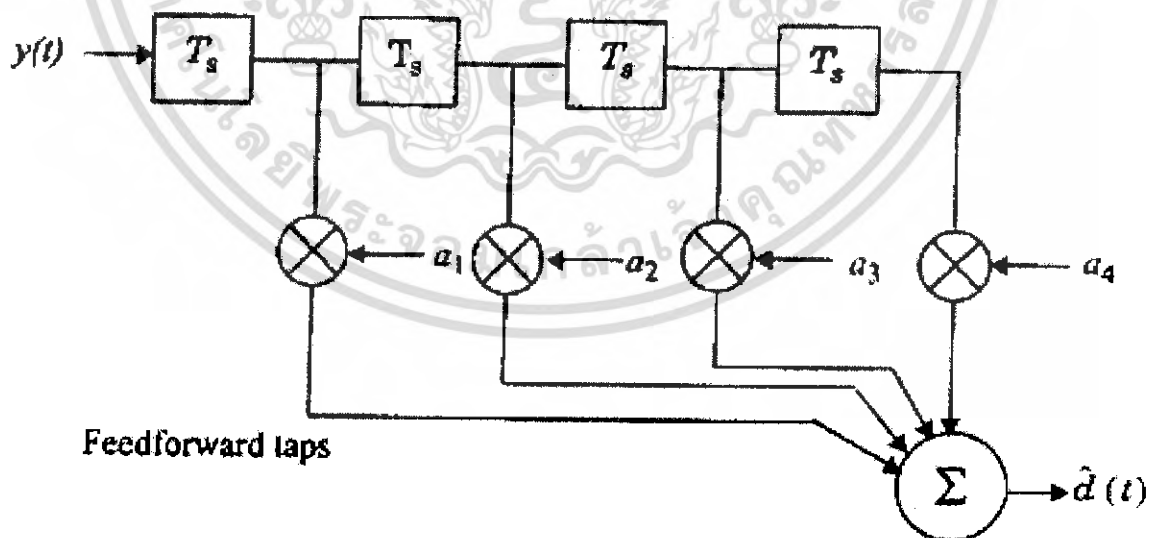
เมื่อเราทำการป้อนสัญญาณ input ($x(t)$) เข้าไปในระบบแล้ว ทางภาคส่ง สัญญาณ input จะเดินทางไปที่ตัว modulator แล้วเดินทางไปที่ ตัว transmitter จากนั้นก็จะส่งเข้า radio channel ซึ่งเป็นช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณ จากนั้นสัญญาณจะเดินทางเข้าสู่ RF Receiver Front End ผ่าน IF และ Detector Matched Filter ซึ่งจะทำการเพิ่ม SNR ให้กับสัญญาณเพื่อจะได้ทำการตรวจจับสัญญาณได้ง่าย หลังจากนั้น สัญญาณจะถูกนำไปรวมกับ Equivalent noise ทำให้สัญญาณเปลี่ยนไปอยู่ในรูป $y(t)$ แล้วเดินทางเข้าสู่ตัว equalizer จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังตัว Decision maker ซึ่งทำหน้าที่ตัดสินใจในการรับสัญญาณว่าตรงกับสัญญาณที่ต้องการจะสื่อสารใช่หรือไม่ ถ้าไม่ใช่ จะทำการส่งย้อนกลับมาที่ตัว equalizer prediction error แล้วส่งย้อนกลับมาที่ตัว Equalizer โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$y(t) = x(t) \otimes f^*(t) + n_b(t) \quad (2.38)$$

$$\hat{d}(t) = x(t) \otimes f^*(t) \otimes h_{eq}(t) + n_b(t) \otimes h_{eq}(t) \quad (2.39)$$

$$f^*(t) \otimes h_{eq}(t) = \delta(t) \quad (2.40)$$

$$F^*(-f)H_{eq}(f) = 1 \quad (2.41)$$

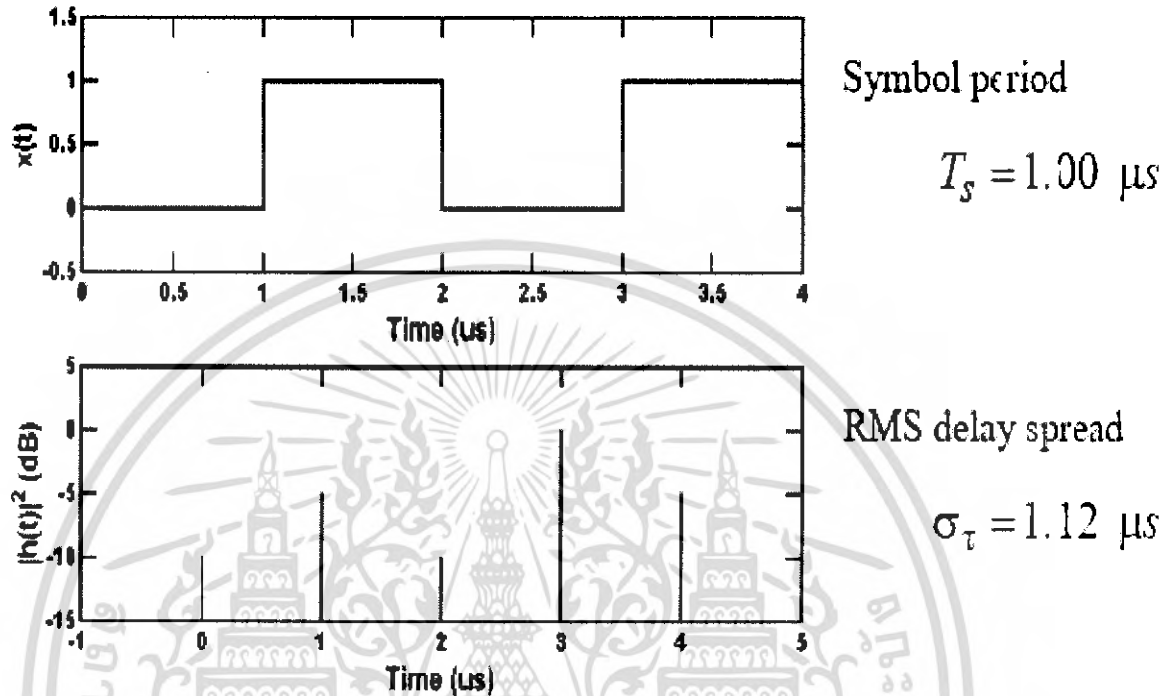


รูปที่ 2.27 ตัวอย่าง Equalizer แบบ FIR (Finite Impulse Response) ซึ่งเป็น Linear Equalizer (Transversal Filter) ที่เป็นแบบ Feed Forward tap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.3 แบบจำลอง Equalization

Time domain

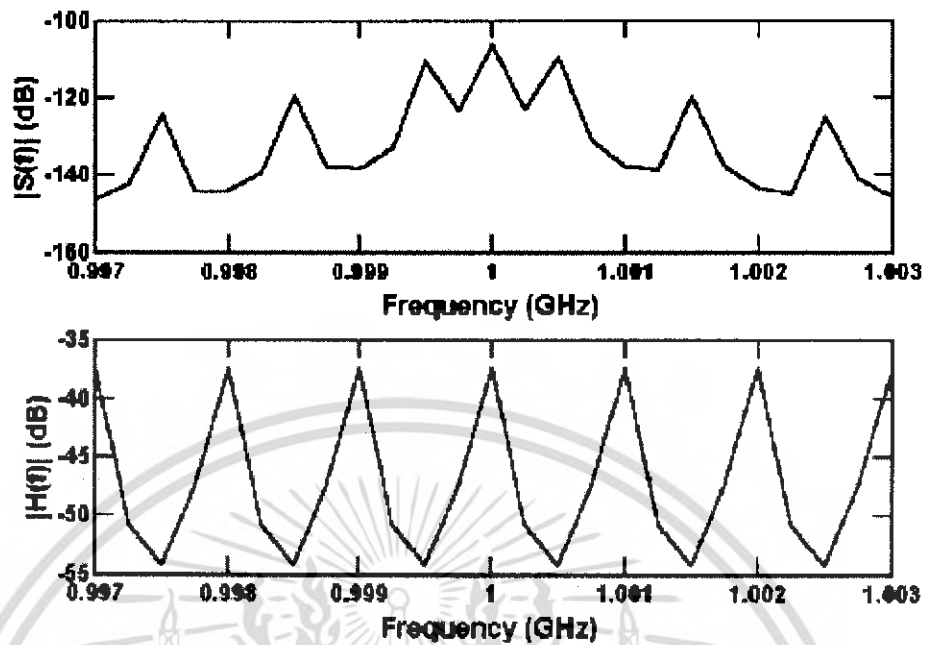


Frequency selective fading

รูปที่ 2.28 ตัวอย่างของรูปกราฟสัญญาณ (a) สัญญาณที่ต้องการส่ง (b) ช่องสัญญาณ ในเชิงเวลา

กราฟด้านบน รูปแรก เป็นสัญญาณที่ต้องการจะส่ง เป็น input $x(t)$ ส่วนกราฟด้านล่างเป็น impulse response ของช่องสัญญาณ โดยอยู่ในรูปของ time domain จากรูปที่ 2.28 จะเห็นว่า คาบของสัญญาณที่เป็นอินพุตนั้นน้อยกว่าคาบของช่องสัญญาณ เมื่อส่งสัญญาณออกไปแล้ว จะเกิดความเพี้ยนไปของช่องสัญญาณ

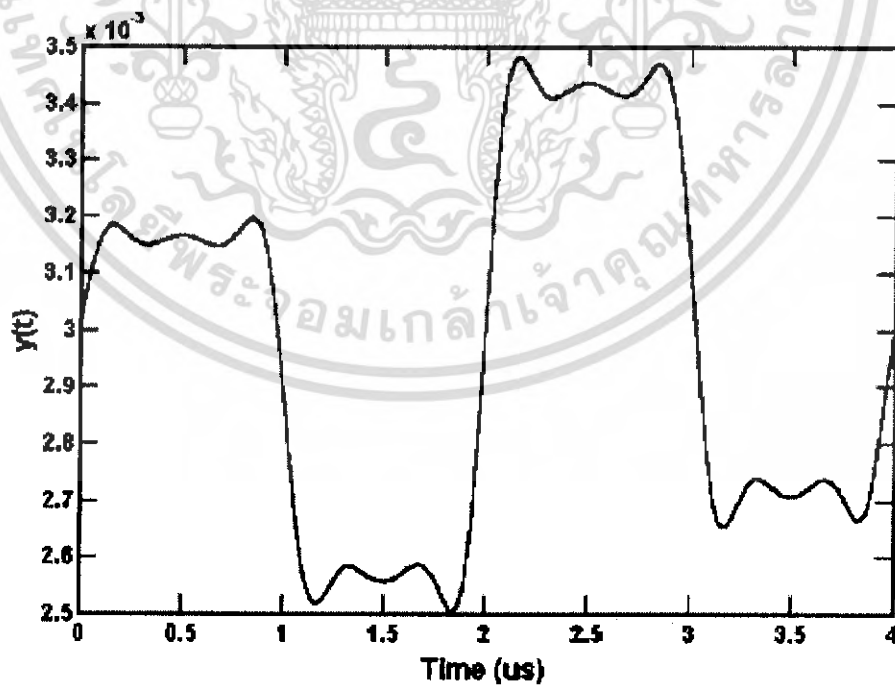
Frequency domain



Frequency selective fading

รูปที่ 2.29 ตัวอย่างของรูปกราฟสัญญาณ(a)สัญญาณที่ต้องการส่ง(b) ช่องสัญญาณในเชิงความถี่
 ในรูปที่ 2.29 นี้ สัญญาณจะอยู่ในรูปของ Frequency domain

Receive Signal

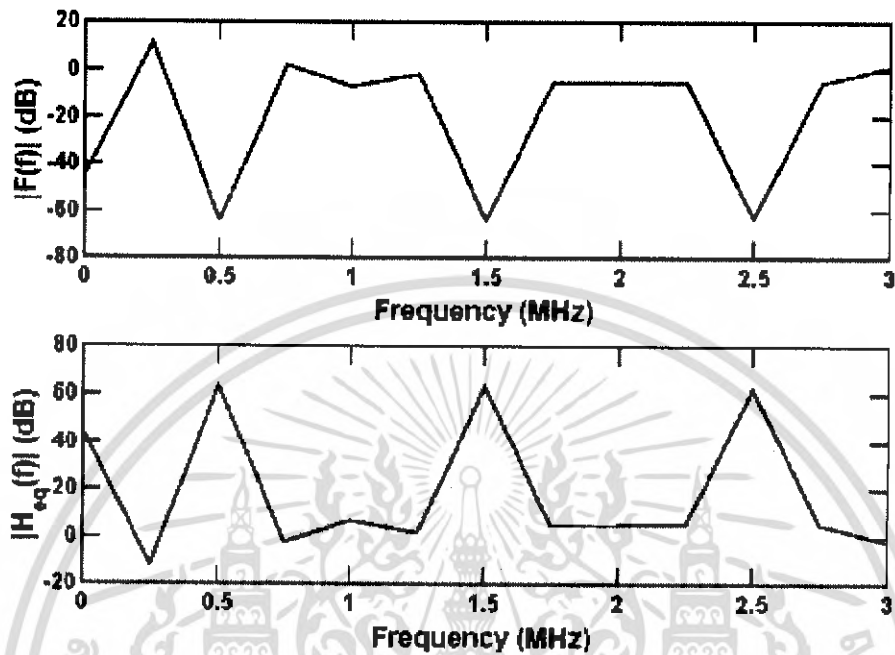


Intersymbol interference (ISI)

รูปที่ 2.30 รูปกราฟของสัญญาณที่ได้รับ โดยไม่ได้ผ่านตัว equalizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

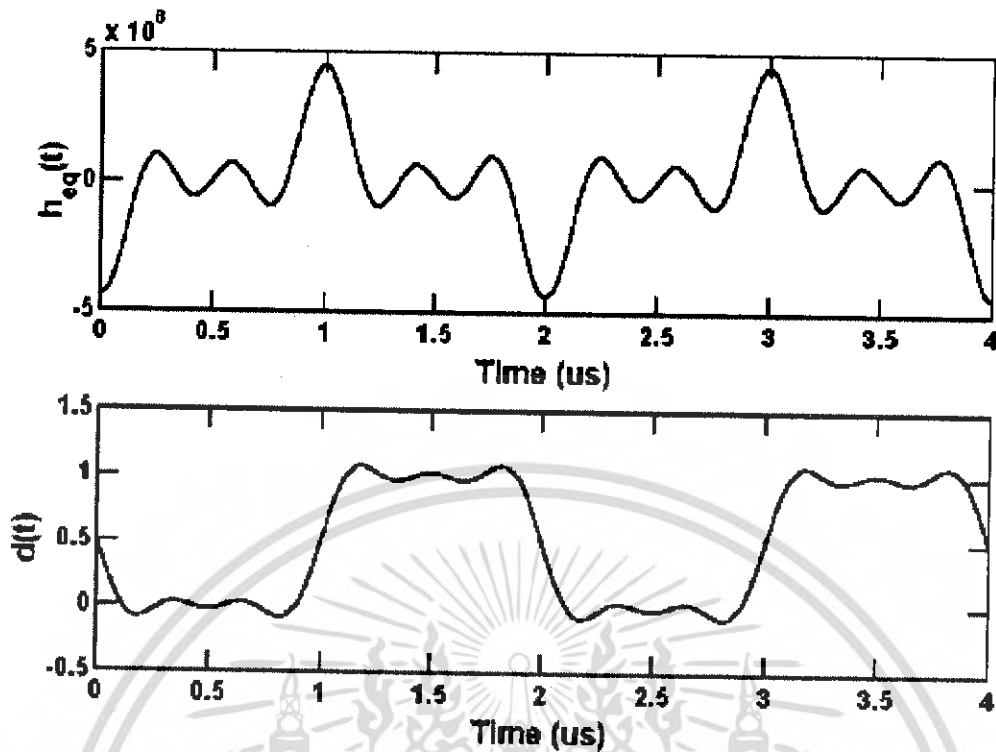
จากรูปที่ 2.30 จะเป็นสัญญาณที่เป็น output จากตัว Detector Matched Filter ซึ่งไม่สามารถแยกได้ว่าสัญญาณไหนเป็นของบิตไหน เกิดปัญหา ISI(Intersymbol Interference)



Frequency selective fading → Flat fading

รูปที่ 2.31 (a) กราฟสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณและ (b) อินเวอร์สของค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณ
จากรูป 2.31 กราฟด้านบนรูปแรก (2.31(a)) เป็นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณทั้งหมดทางฝั่งภาคส่ง กราฟค่าสัมประสิทธิ์ตัว equalization ด้านล่าง(2.31(b)) จะต้องเป็นอินเวอร์สของกราฟด้านบน(2.31(a)) ตามเงื่อนไขข้อที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 (a) กราฟสัมประสิทธิ์ของสัญญาณในโดเมนเวลา (b) ผลลัพธ์เมื่อนำสัญญาณในรูปที่ 2.30 มา convolution กับสัญญาณในรูปที่ 2.32 (a)

จากรูปที่ 2.31 นำกราฟค่าสัมประสิทธิ์ของ equalizer มาทำ Inverse Fourier Transform ให้ได้เป็น impulse response ของตัว equalizer ในรูปของ Time Domain ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.32(a) รูปกราฟด้านบนจากนั้น นำมาทำ convolution กับ output ของสัญญาณจากตัว Detector Matched Filter ก็จะได้ผลลัพธ์ของสัญญาณออกมาเป็นรูปกราฟด้านบนอันที่ 2.32(b) ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า สามารถแยกได้ว่า สัญญาณใดเป็นของบิดใด

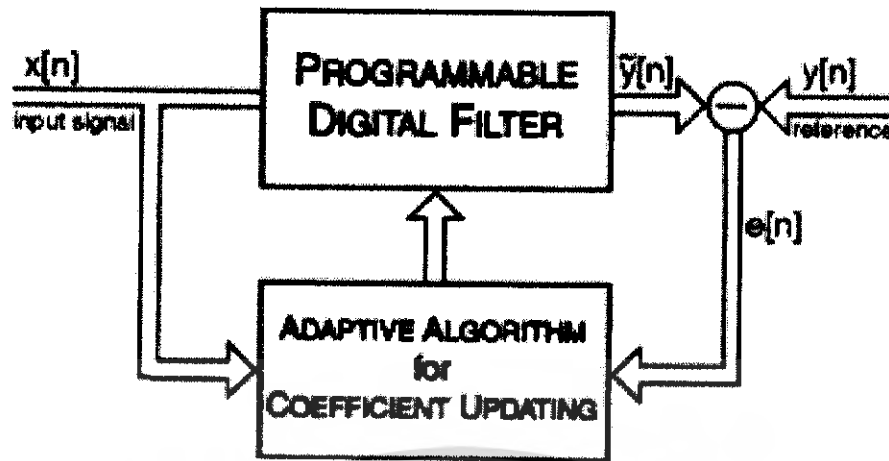
2.16 Adaptive Filtering

2.16.1 Structure of Adaptive Filter

ในระบบสื่อสาร Adaptive filter มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา digital filter จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนค่า coefficient ให้เหมาะสม สมตามสัญญาณขาเข้าที่แต่ละเวลาได้ โครงสร้างของ Adaptive filter มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ

1. Digital filter ที่มี coefficient ปรับค่าได้
2. Adaptive algorithm ที่ใช้ปรับ coefficient ของ filter

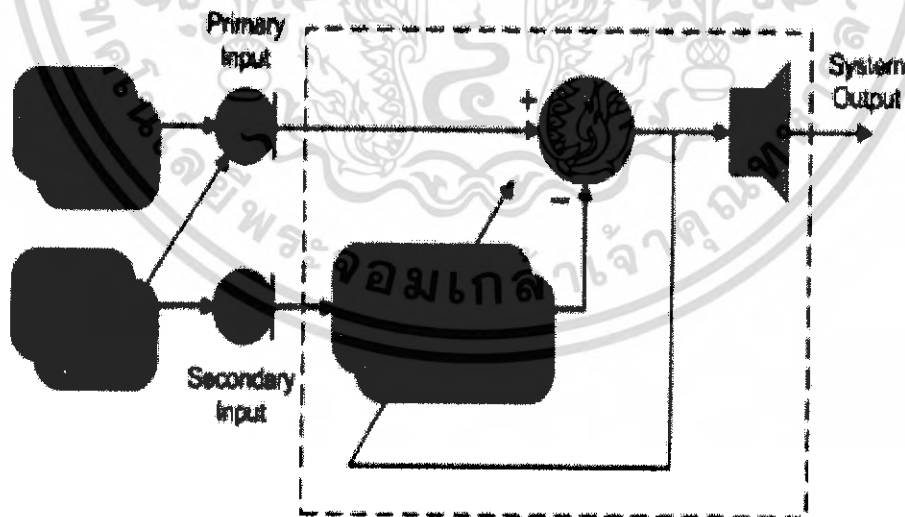
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 General form of Adaptive Filter

2.16.2 Concept of Adaptive Filter for Noise Cancellation

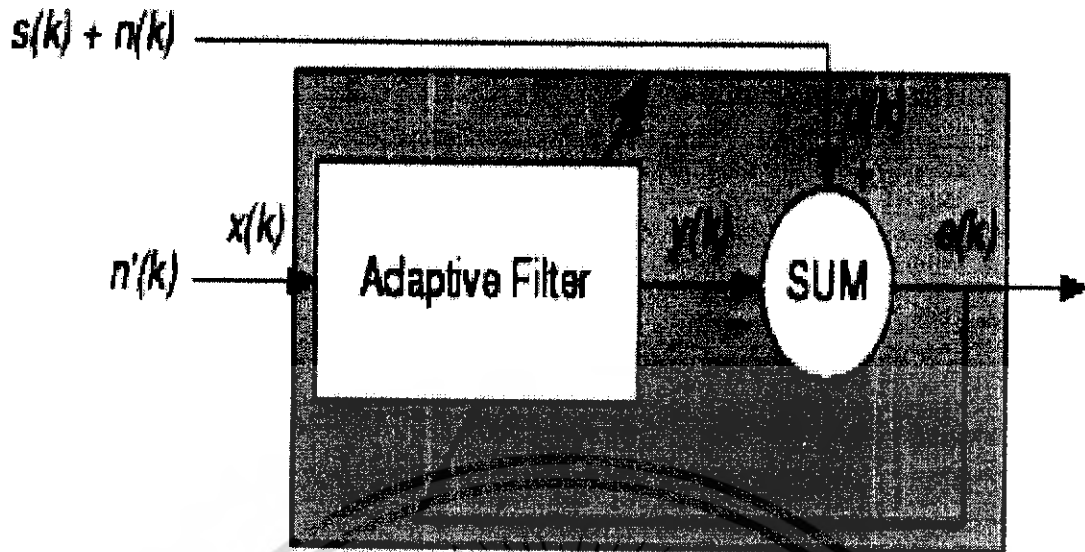
โครงสร้างของ Adaptive filter สำหรับ noise cancellation เป็นดังรูปที่ 2.34 ระบบที่พิจารณาเป็น Dual-channel Systems (ไมโครโฟน 2 อัน) โดย Adaptive filter ที่ใช้มีจุดมุ่งหมายเพื่อขจัดสัญญาณรบกวน จากรูป primary input เป็นสัญญาณที่ต้องการ (desired signal) รวมกับ noise และ secondary input คือ noise source เพื่อกำเนิด noise ที่มีความสัมพันธ์กับ noise ใน primary input เพื่อทำการหักล้างกับสัญญาณจาก primary input ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2.34 Adaptive filter for Noise cancellation

เพื่อพิจารณาง่ายขึ้นจะเป็นดังรูปที่ 2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 Adaptive filter for Noise cancellation

ซึ่งโครงสร้างของ Adaptive Filter ดังรูปที่ 2.35 จะได้ Output ดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} w_k^* u(n-k), n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.42)$$

เมื่อ Order ของ Adaptive filter เท่ากับ M

โดยที่

$$\mathbf{u}(n) = [u(n), u(n-1), \dots, u(n-m+1)]^T \text{ - input speech}$$

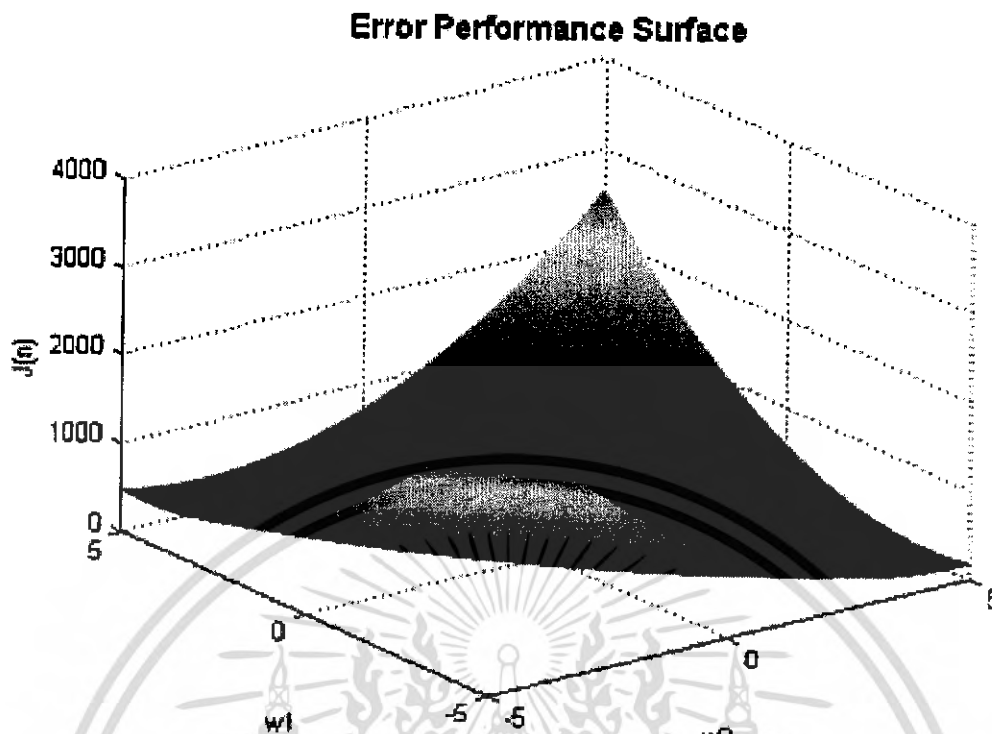
$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{M-1}(n)]^T \text{ - tap-weightvector}$$

$$y(n) = \mathbf{w}(n)^H \mathbf{u}(n) \text{ - output "enhanced" speech}$$

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{w}(n)^H \mathbf{u}(n) \text{ - error signal}$$

$$J(n) = E\{e(n)e^*(n)\} = E\{|e(n)|^2\} \text{ - error performance fcn.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 แสดง error performance surface ของ $J(n)$

2.16.3 Adaptive algorithm

หลักการปรับค่าเปลี่ยนค่า coefficient ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นไปดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \text{New} \\ \text{Parameter} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Old} \\ \text{Parameter} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Step} \\ \text{Size} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{Function} \\ \text{of Input} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{Function} \\ \text{of Error} \end{bmatrix}$$

μ $f(x[n])$ $f(e[n])$

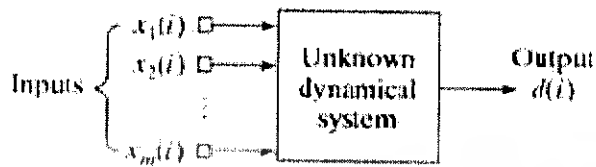
coefficient ตัวใหม่ ขึ้นกับ coefficient ที่เวลาก่อนหน้า รวมกับ การให้ความสำคัญกับสัญญาณเข้าตัวใหม่ที่เข้ามา กับ error

โดย Algorithm ที่ใช้ในการปรับค่า coefficient ของ adaptive filter มีใช้หลาย algorithm ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึง LMS algorithm

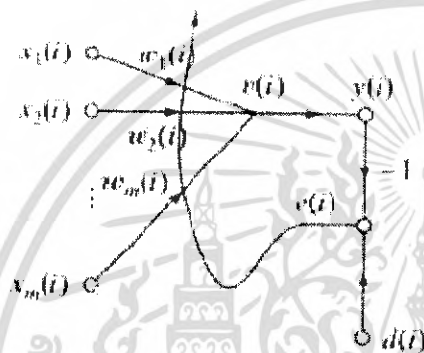
ข้อได้เปรียบของตัวกรองแบบปรับค่าได้ข้อหนึ่ง คือ มีสูตรการคำนวณที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณขาเข้า ที่สำคัญค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองจะถูกปรับโดยอัลกอริทึมให้เหมาะสมเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสัญญาณขาเข้าขึ้น [3] ตัวกรองแบบปรับตัวได้ถูกนำไปใช้งานในภาวะที่ไม่สามารถใช้ตัวกรองแบบธรรมดาได้หรือใช้ไม่ได้ดีนัก เช่น เมื่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ต้องการอยู่ในย่านความถี่เดียวกันหรือเมื่อไม่รู้ลักษณะที่แน่นอนของสัญญาณที่ต้องการตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานตัวกรองแบบปรับตัวได้ ได้แก่ ด้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Identification เช่น System identification และ Layered earth modeling; ด้าน Inverse modeling เช่น Deconvolution และ Blind equalization; ด้านการทำนาย เช่น Linear predictive coding และ Signal detection; ด้าน Interference canceling เช่น Noise canceling และ Echo cancellation

- Linear neuron with output



(a)



(b)

$$y(i) = \mathbf{x}^T(i)\mathbf{w}(i) = \sum_{k=1}^m w_k(i)x_k(i)$$

รูปที่ 2.37 (a) Unknown dynamical system (b) Signal-flow graph of adaptive model for the system โดยที่

$$\mathbf{w}(i) = [w_1(i), w_2(i), \dots, w_m(i)]^T \quad (2.48)$$

$$\mathbf{x}(i) = [x_1(i), x_2(i), \dots, x_m(i)]^T \quad (2.49)$$

- ค่าความผิดพลาด (error signal) $e(i) = d(i) - y(i)$ จะถูกใช้ในการปรับค่า weight vector โดยการ minimize cost function
 - $\mathbf{x}(i)$ อาจเป็นข้อมูลที่มีหลายปัจจัยซึ่งเกิดในเวลาเดียวกัน (snap shot) หรือข้อมูลตัวเดียวกันแต่คนละเวลา (Uniformly space in time)
 - การคำนวณเริ่มจากการเลือกค่า synaptic weight โดยการสุ่มเดา
 - การคำนวณเพื่อเปลี่ยนแปลงค่า synaptic weight จะทำเสร็จในหนึ่งช่วงการ sampling
- การคำนวณแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ

1. Filtering process ซึ่งเป็นการคำนวณค่า output และการคำนวณค่า error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Adaptive process เป็นการปรับค่า synaptic weights

2.17 Least-Mean-Square Algorithm (LMS)

- Cost function คือ sum of error squares ซึ่งคำนวณจากค่า “instantaneous value” คำนี

$$\varepsilon(w) = \frac{1}{2} e^2(n) \quad (2.50)$$

โดยที่ $e(n)$ คือ the error signal ที่เวลา n

$$e(n) = d(n) - x^T(n)w(n) \quad (2.51)$$

- จาก (2.51)

$$\frac{\partial e(n)}{\partial w(n)} = -X(n) \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w(n)} = -X(n)e(n) = \hat{g}(n) \quad (2.53)$$

- จาก (3.12)

$$w(n+1) = w(n) - \eta g(n), \quad (2.54)$$

จะได้

$$\hat{w}(n+1) = \hat{w}(n) + \eta x(n)e(n) \quad (2.55)$$

- LMS algorithm เป็นเครื่องมือมาตรฐานในกระบวนการ Adaptive signal processing เช่น Equalization active noise control, Noise cancellation
- ง่ายต่อการคำนวณ
- โครงสร้างมีความเป็นอิสระเพื่อความแข็งแรง
- LMS algorithm สามารถลดค่า maximum possible estimation error ให้เหลือน้อยที่สุด
- ในทางปฏิบัติ LMS algorithm ถูกนำมาใช้บ่อยสำหรับการ tracking การเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ในข้อมูลที่เป็นข้อมูลป้อนเข้า (Input data)
- ผลลัพธ์จะค่อยๆเข้ามาบรรจบกัน
- มีความไวต่อ high condition number (eigenvalue spread) of the data
- จะนำมาทำการ Correlation กับ matrix R_x .
- โดยทั่วไปแล้ว ค่าพารามิเตอร์ของ LMS algorithm จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ที่เหมาะสม ค่าหนึ่ง $\eta(n) = \eta_0$ สำหรับทุกๆ n .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในสถานะแวดล้อมที่คงที่ จะใช้วิธีการที่ดีกว่าคือใช้ annealed learning rate

$$\eta(n) = \frac{\eta_0}{1 + n/\tau} \quad (2.56)$$

- การใช้ search time constant τ จะทำให้ขั้นแรกของอัลกอริทึมสามารถแก้ไขปัญหาค้นหาได้ใกล้เคียงที่สุด
- หลังจากนั้น การลดค่า $\eta(n)$ จะทำให้อัลกอริทึมยิ่งเบนเข้าใกล้วิธีแก้ปัญหาค้นหาที่เหมาะสมที่สุด
- A similar time-varying learning parameter $\eta(n)$ is useful also in other stochastic gradient algorithms.
- ข้อดีของ LMS คือ ไม่ต้องรู้ autocorrelation matrix (R) และ cross correlation matrix (P)

2.18 ไดเวอร์ซิตี (Diversity)

ไดเวอร์ซิตี (diversity) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตพิเศษรวมเข้าไปกับบิตข้อมูลอย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ และไม่ต้องมีการส่งชุดลำดับการฝึกสำหรับใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณของวงจร Equalizer ซึ่งหมายถึงว่า ไม่มีการแบ่ง Bandwidth ของช่องสัญญาณไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามาสำหรับการทำไดเวอร์ซิตีก็มีราคาไม่แพงเกินไป ดังนั้นไดเวอร์ซิตีจึงมีประโยชน์อย่างมากในทางปฏิบัติ

หลักการของ diversity อาศัยคุณสมบัติพื้นฐานการแพร่กระจายของคลื่นสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้วถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่งถูกรบกวนอย่างมากจาก fading ทำให้สัญญาณที่รับได้มีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่นที่ให้สัญญาณกำลังสูง ดังนั้นถ้าหากเราติดตั้งจุดรับสัญญาณมากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็สามารถที่จะเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ วิธีการนี้สามารถช่วยทำให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้นโดยที่ทางภาคส่งสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องกับเลย

ไดเวอร์ซิตีทางสเปซ

ไดเวอร์ซิตีทางสเปซ (space diversity หรือบางทีเรียกว่า antenna diversity) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานอย่างมากในทางปฏิบัติ เราสามารถแบ่งลักษณะการรับสัญญาณของวิธีการนี้ออกได้เป็น 4 รูปแบบ คือ

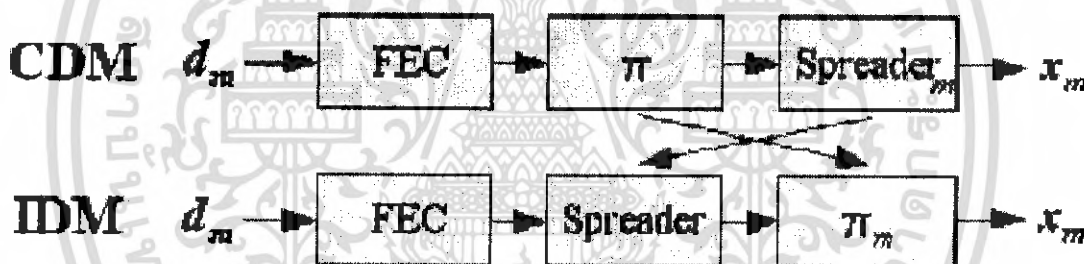
- Selection Diversity
- Feedback or Scanning Diversity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Maximal Ratio Combining
- Equal Gain Combining

2.19 ความแตกต่างระหว่าง CDMA และ IDMA

ข้อแตกต่างระหว่าง IDMA กับ CDMA อาจจะมีมองเห็นไม่ชัดเจนนักในฝั่งภาคส่ง แต่จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทางฝั่งภาครับ ซึ่งก็คือ ในการแยกสัญญาณของทางภาคส่ง ในระบบ CDMA จะแยกโดยใช้ Spreading Sequence ที่ต่างกันในการระบุสัญญาณของทางภาคส่ง ซึ่งมีข้อเสียคือ เมื่อจำนวนผู้ใช้งานมีจำนวนมาก ทำให้ความซับซ้อนของระบบฝั่งภาครับมีมากขึ้น เนื่องจากต้องใช้เวลาประมวลผลแยกสัญญาณที่นานขึ้น ทั้งยังต้องมีพื้นที่ที่ใช้ในการประมวลผลมากขึ้น ดังนั้น ในระบบ IDMA จึงแก้ปัญหาดังกล่าว โดยกำหนดให้ Spreading Sequence มีค่าเหมือนกันสำหรับทุก User แล้วใช้ตัว Interleaver เป็นตัวแยกสัญญาณของผู้ใช้ในฝั่งภาครับ โดย User ที่ต่างกันจะต้องใช้ Interleaver ที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ลดความซับซ้อนของวงจรในภาครับลง ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของระบบ IDMA



รูปที่ 2.38 Block diagram ของระบบ CDMA และ IDMA ตามลำดับ

ผลลัพธ์ของสัญญาณในระบบ IDMA นั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้ แม้ว่าจะมีผู้ใช้เป็นจำนวนมาก คุณภาพของสัญญาณทางฝั่งภาครับก็ไม่ได้ลดลง แต่ผลลัพธ์ของสัญญาณทางฝั่งภาครับจะขึ้นอยู่กับ ค่า SNR (Signal to noise ratio) ซึ่งต่างกับระบบ CDMA ทั่วไป ที่คุณภาพของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับจำนวนของผู้ใช้

2.20 ข้อดีของระบบ IDMA

ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า ระบบสื่อสาร IDMA นั้น ได้ดัดแปลงมาจากระบบสื่อสาร CDMA ระบบการสื่อสารแบบ IDMA จึงยังคงคุณสมบัติ ข้อดีต่างๆ ของระบบการสื่อสาร CDMA ไว้ได้ ในขณะที่สามารถแก้ไขข้อบกพร่องบางประการของระบบการสื่อสารแบบ CDMA ด้วย ดังนี้

1. สามารถรองรับปริมาณผู้ใช้งานได้จำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ลดปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณข้ามเซลล์กัน
3. ลดปัญหาการชนกันของสัญญาณ
4. ลดความซับซ้อนของระบบในฝั่งภาครับซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในระบบการสื่อสาร CDMA
5. แก้ไขปัญหาเรื่องErrorต่างๆ เช่น Burst Error (bits Error ที่เกิดขึ้นเป็นลำดับตามเวลาและเกิดขึ้นเป็นกลุ่มของบิตข้อมูล อาจมีสาเหตุมาจากความบกพร่องของสื่อที่ใช้ส่งข้อมูล)

จากบทความที่นำเสนอโดย Prof.Li Ping,[]แสดงให้เห็นว่าระบบIDMAให้ผลของสัญญาณที่ดีกว่าระบบCDMAทั่วไป

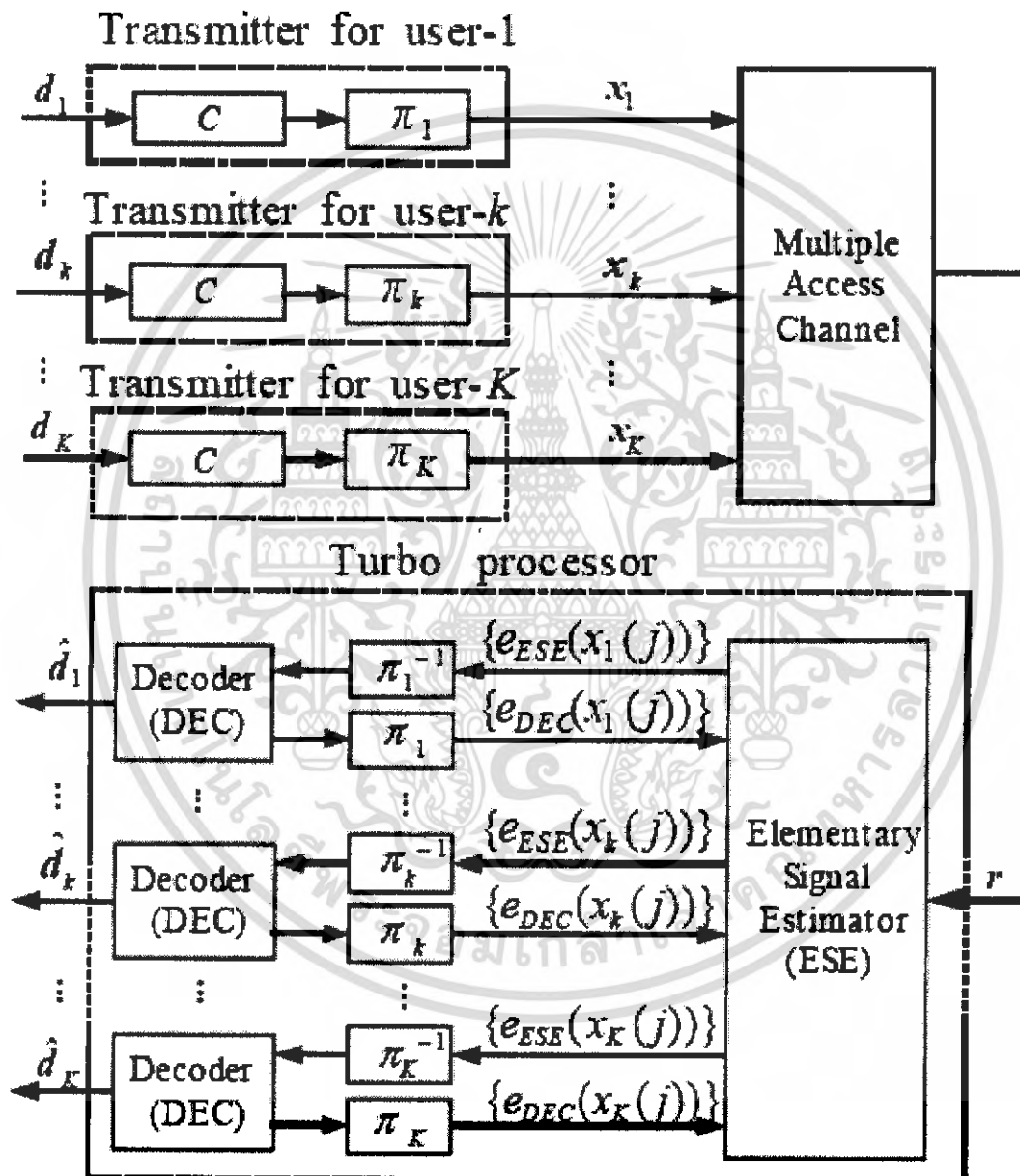


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โครงสร้างของระบบ IDMA

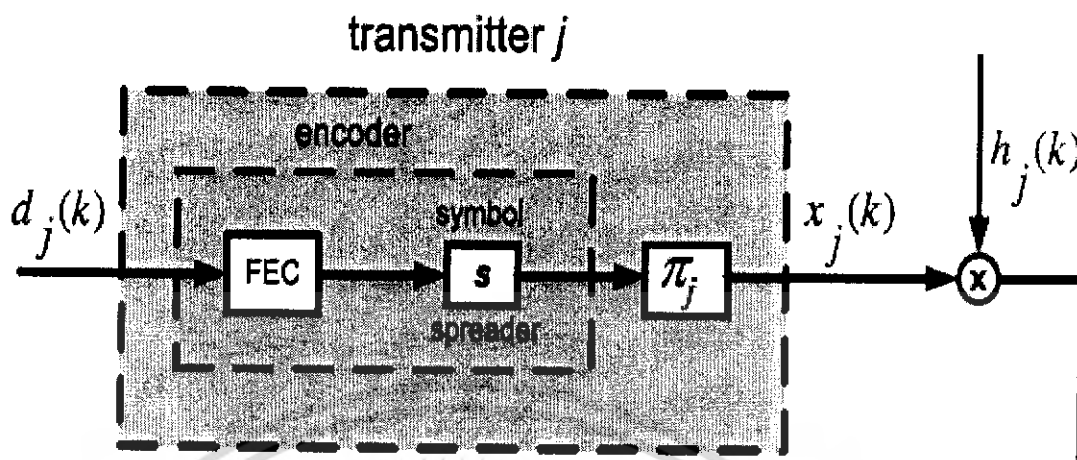
3.1 โครงสร้างของระบบ IDMA

รูปที่ 3.1 โครงสร้างภาคส่งและภาครับของระบบสื่อสาร IDMA โดยที่ $(\pi^{(k)})$ เป็นตัว Interleaver

สำหรับ user-k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 Transmitter Structure ของระบบ IDMA



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบ IDMA ทางภาคส่ง

โครงสร้างทางฝั่งภาคส่ง(The transmitter Structure)

ในรูปที่ 3.2 นี้ ได้แสดงถึงโครงสร้างทางฝั่งภาคส่งของระบบ IDMA ที่มีผู้ใช้พร้อมกันจำนวน K users ลำดับของข้อมูล input d_k ของ user ที่ k จะถูกทำการเข้ารหัสโดยยึดหลัก low-rate code C ข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสจะถูกส่งไปทำ interleave โดย chip-level interleaver (π_k) ตามลำดับ โดยเมื่อข้อมูลผ่านตัว interleaver แล้วจะอยู่ในรูป $x_k \equiv [x_k(1), \dots, x_k(j), \dots, x_k(J)]^T$ ซึ่งเราจะเรียก $x_k(j)$ ว่า “chips”

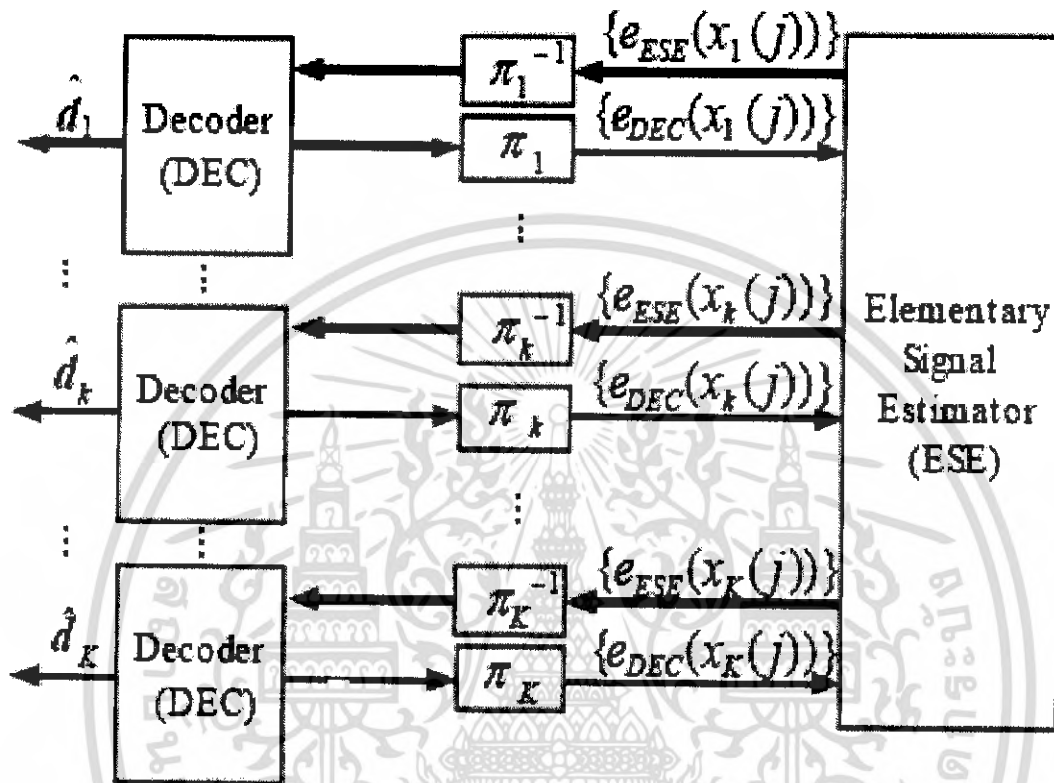
หลักการสำคัญของระบบ IDMA คือ ตัว interleaver $\{\pi_k\}$ ของแต่ละ user จะต้องแตกต่างกัน เราสมมติให้ตัว interleaver ถูกสร้างขึ้นอย่างอิสระไม่มีแบบแผน ตัว interleavers เหล่านี้มีหน้าที่ทำให้ coded sequence กระจายกระจายไป เพื่อที่ chips ที่อยู่ใกล้เคียงกันจะได้ไม่เกิดความเกี่ยวพันปะปนกัน ทำให้วิธีการ simple chip-by-chip detection นั้นทำได้ง่ายขึ้น

สมมติของสัญญาณ single-path อยู่คงที่หลังจาก chip-matched filtering สัญญาณที่ได้รับจาก K users สามารถเขียนในรูปสมการเป็น

$$r(j) = \sum_{k=1}^K h_k x_k(j) + n(j), j = 1, 2, \dots, J$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 Iterative Chip-by-chip Receiver



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบ IDMA ทางภาครับที่เป็นแบบ Iterative โดยมีการเชื่อมต่อกันระหว่าง Channel Estimation และ Multi-user Detection

โครงสร้างทางฝั่งภาครับ (Receiver Structure)

การทำงานของ โครงสร้างทางภาครับนั้น ยังคงยึดหลักการกำหนด 2 ข้อ คือ

- (i) การกำหนด FEC code C
- (ii) ข้อจำกัดอันเนื่องมาจากการซ้อนทับกันของ chips ที่ถูกส่งมาจากภาครับ

เพื่อความง่ายต่อการศึกษา ระบบจะสนใจแค่เพียงที่การส่งสัญญาณแบบ synchronous BPSK เช่น $x_k(j) \in \{+1, -1\}$ และ real channel coefficients ผ่านช่องสัญญาณแบบ time-invariant single-path กำหนดให้ $e(x_k(j))$ เป็นข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องกับ $x_k(j)$ ซึ่ง $e(x_k(j))$ นี้จะถูกแบ่งออกเป็นอีก 2 ประเภท คือ $e_{ESE}(x_k(j))$ และ $e_{DEC}(x_k(j))$ ขึ้นอยู่กับว่ามันถูกสร้างมาจาก ESE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ DECs ระหว่างกระบวนการ turbo-type iterative process ข้อมูลที่ไม่จำเป็นที่เกิดจาก ESE (หลังจากการ de-interleaving) เป็น priori information ใน DECs

ตัว ESE จะใช้ $\{r(j)\}$ และ $\{e_{DEC}(x_k(j))\}$ เป็น inputs ของมันและข้อบังคับของ (ii) เพียงข้อเดียวที่นำมาพิจารณา output ของ ESE $\{e_{ESE}(x_k(j))\}$ จะเป็นข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องกับ $\{x_k(j)\}$ ชุด De-interleave $\{e_{ESE}(x_k(j)), \forall_j\}$ ของ จะถูกนำมาใช้เป็น a priori information ใน k^{th} DEC สำหรับ user ที่ k output ของ k^{th} DEC (หลังจากทำ interleaving) จะเป็นข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องที่ผ่านการ update แล้ว $\{e_{DEC}(x_k(j)), \forall_j\}$ โดยยึดหลักของ code constraint

โดยสัญญาณที่ทางภาครับตรวจจับได้จะอยู่ในรูป

$$r_j = \sum_{k=1}^K h^{(k)} x_j^{(k)} + n_j, j = 1, 2, \dots, J \quad (3.1)$$

โดยที่ $x_j^{(k)} \in \{+1, -1\}$ เป็น chip ที่ถูกส่งมาจาก user-k ณ เวลา j

$h^{(k)}$ เป็น channel-coefficient สำหรับ user-k

n_j เป็น ค่า zero-mean AWGN ที่แปรตาม $\sigma^2 = N_0 / 2$

โครงสร้างทางภาครับแบบ Iterative chip-by-chip ประกอบด้วย Elementary signal estimator (ESE) และ bank of K single-user a posteriori probability decoders ที่เป็นตัวทำหน้าที่ใน ด้าน De-spreading operation (DES) ที่ทำงานในรูปแบบ turbo-type

ตัว ESE จะทำหน้าที่ในเป็น chip-by-chip estimation คือ หาค่าสัมประสิทธิ์ของ ช่องสัญญาณ (coefficient channel " $h^{(k)}$ ") เราจะเน้นความสำคัญในการพิจารณาที่ $x_j^{(k)}$ และเขียน (3.1) ใหม่ ได้เป็น

$$r_j = h^{(k)} x_j^{(k)} + \zeta_j^{(k)} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\zeta_j^{(k)} \equiv r_j - h^{(k)} x_j^{(k)}$ เป็นเทอมของการผิดเพี้ยนของช่องสัญญาณ เราจะทำให้ $x_j^{(k)}$ แต่ละค่าเป็นค่าสุ่มที่ค่าเฉลี่ย $E(x_j^{(k)})$ และค่าความแปรปรวน $\text{Var}(x_j^{(k)})$ เป็น 0 และ 1 ตามลำดับ ดังนั้น จาก(3.1) จะได้เป็น

$$E(r_j) = \sum_{k=1}^K h^{(k)} E(x_j^{(k)}) \quad (3.3)$$

$$\text{Var}(r_j) = \sum_{k=1}^K |h^{(k)}|^2 \text{Var}(x_j^{(k)}) + \sigma^2 \quad (3.4)$$

จากการใช้ทฤษฎี Central limit ในสมการ (3.2) สามารถประมาณค่าได้จาก Gaussian Random Variable ด้วย

$$E(\zeta_j^{(k)}) = E(r_j) - h^{(k)} E(x_j^{(k)}) \quad (3.5)$$

$$\text{Var}(\zeta_j^{(k)}) = \text{Var}(r_j) - |h^{(k)}|^2 \text{Var}(x_j^{(k)}) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า output ของตัว ESE จะเป็น logarithm likelihood ratios (LLRs) ซึ่งเกี่ยวข้องกับ $\{x_j^{(k)}\}$ ที่คำนวณโดยยึดหลักการจากสมการข้อ(3.4 และ 3.5) (ใช้(3.5)และ(3.6)) ได้เป็น

$$L(x_j^{(k)}) \equiv \log\left(\frac{\Pr(x_j^{(k)} = +1|r_j)}{\Pr(x_j^{(k)} = -1|r_j)}\right) \quad (3.7)$$

$$= \log\frac{\exp\left(-\frac{(r_j - E(\zeta_j^{(k)}) - h^{(k)})^2}{2\text{Var}(\zeta_j^{(k)})}\right)}{\exp\left(-\frac{(r_j - E(\zeta_j^{(k)}) + h^{(k)})^2}{2\text{Var}(\zeta_j^{(k)})}\right)} \quad (3.8)$$

$$= \frac{2h^{(k)}(r_j - E(\zeta_j^{(k)}))}{\text{Var}(\zeta_j^{(k)})}, \forall k, j \quad (3.9)$$

จาก user ที่ k Output ของ ESE $\{L(x_j^{(k)}), j = 1, 2, \dots, J\}$ จะต้องถูกนำไปทำกระบวนการ De-interleaving ให้อยู่ในรูป $\{L(c_j^{(k)}), j = 1, 2, \dots, J\}$ และส่งไปที่ DES ของ user นั้นๆ ซึ่งตัว DEC จะทำ De-spreading soft-in/soft-out chip-by-chip despreading

เพื่อความง่ายต่อการศึกษา เราจะพิจารณา chips ที่เกี่ยวข้องกับ $d_1^{(k)}$ ซึ่งเป็นบิตแรกของ user-k ซึ่งปฏิบัติการสำหรับ chips ตัวอื่นๆก็จะเหมือนกัน กล่าวย้อนกลับไปอีกครั้งว่า $d_1^{(k)}$ จะถูกแผ่ขยายไปอยู่ในรูป chip sequence $d_1^{(k)} s^{(k)} = \{c_j^{(k)}, j = 1, 2, \dots, S\}$ โดยที่ $s^{(k)} = \{s_j^{(k)}\}$ เป็น binary signature sequence ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $\{+1, -1\}$ สำหรับ user-k เราสมมติว่า $\{L(c_j^{(k)})\}$ แต่ละตัวนั้นไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งตามหลักการแล้วก็ควรจะเป็นไปตามนั้น เนื่องจากสัญญาณได้ผ่านการทำ Interleaving แล้วสำหรับแต่ละ User ซึ่งจะถูกแสดงในรูป $\pi^{(k)}(j) = j'$ ยกตัวอย่างเช่น $c_j^{(k)} = x_{j'}^{(k)}$ จากเงื่อนไขสมการที่ 3.5 a posteriori LLR สำหรับ $d_1^{(k)}$ สามารถประมวลผลได้โดยใช้ $\{L(c_j^{(k)})\}$ เป็น

$$L(d_1^{(k)}) \equiv \log\left(\frac{\Pr(d_1^{(k)} = +1|r)}{\Pr(d_1^{(k)} = -1|r)}\right) \quad (3.10)$$

$$= \log\left(\frac{\prod_{j=1}^S \Pr(c_j^{(k)} = s_j^{(k)}|r_{j'})}{\prod_{j=1}^S \Pr(c_j^{(k)} = -s_j^{(k)}|r_{j'})}\right) \quad (3.11)$$

$$= \sum_{j=1}^S \log \frac{\Pr(c_j^{(k)} = s_j^{(k)}|r_{j'})}{\Pr(c_j^{(k)} = -s_j^{(k)}|r_{j'})} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sum_{j=1}^S s_j^{(k)} L(c_j^{(k)}) \quad (3.13)$$

ข้อมูล LLR ที่เป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ chip $c_j^{(k)}$ ภายใน $d_1^{(k)} s^{(k)}$ จะถูกกำหนดให้เป็น

$$Ext(c_j^{(k)}) \equiv \log\left(\frac{\Pr(c_j^{(k)} = +1|r)}{\Pr(c_j^{(k)} = -1|r)}\right) - L(c_j^{(k)}) \quad (3.14)$$

จะสังเกตเห็นได้ว่า $c_j^{(k)} = +1$ ถ้า $s_j^{(k)} = d_1^{(k)}$ และ $c_j^{(k)} = -1$ ในกรณีอื่นๆ ดังนั้นจะได้ว่า

$$Ext(c_j^{(k)}) = s_j^{(k)} L(d_1^{(k)}) - L(c_j^{(k)}) \quad (3.15)$$

ตัว Extrinsic LLRs $\{Ext(c_j^{(k)})\}$ จะเป็น output ของ DEC และถูกส่งย้อนกลับมาที่ ESE หลังจากทำการ interleaving (ดูรูปที่ 3.3) ในการทำ Iteration ครั้งต่อไป $\{Ext(x_j^{(k)})\}$ จะถูกใช้ในการ update $\{Ext(x_j^{(k)})\}$ และ $\{Var(x_j^{(m)})\}$

$$E(x_j^{(k)}) = \frac{\exp(Ext(x_j^{(k)})) - 1}{\exp(Ext(x_j^{(k)})) + 1} = \tanh\left(\frac{Ext(x_j^{(k)})}{2}\right) \quad (3.16)$$

$$Var(x_j^{(k)}) = 1 - E(x_j^{(k)})^2 \quad (3.17)$$

กระบวนการ Iterative นี้จะวนซ้ำๆกันไปตามจำนวนรอบที่ได้กำหนดไว้ในโปรแกรม ซึ่งในการทำ iteration ครั้งสุดท้าย DEC จะต้องทำการตัดสินใจเชิงบ่งชี้บน information bits ตามเงื่อนไข(3.13) ตัว DEC จะถอดรหัสสัญญาณ $\{\hat{d}_k\}$ ได้ใกล้เคียงที่สุดหรือตรงกับข้อมูลทางฝั่งภาคส่งที่ต้องการจะส่ง วิธีการถอดรหัส APP ในตัว DEC จะใช้เป็นฟังก์ชันมาตรฐานอยู่แล้ว

กล่าวโดยสรุป Normalized complexity ต่อ บิตข้อมูล ต่อผู้ใช้ ต่อ iterative แต่ละรอบ จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเทียบกับความยาวของ spreading sequence แต่จะไม่ขึ้นกับจำนวนผู้ใช้งาน เมื่อทำการเปรียบเทียบแล้ว วิธีแบบ MAP Decoder มีความซับซ้อน $O(2^K)$ ส่วนวิธีการเมตริกซ์ของ MMSE มีความซับซ้อนเป็น $O(K^2)$ เมื่อ K คือจำนวนผู้ใช้งาน

3.2 The ESE function

กล่าวย้อนกลับไปหัวข้อเรื่อง CDMA เราพยายามที่จะลดความซับซ้อนในตัว EMUD ในรูปที่ ให้เหลือน้อยที่สุด จึงได้นำมาเป็นวิธีการที่ใช้ในรูปที่ โดยที่ ESE เป็นเวอร์ชันที่เข้าใจได้ง่ายของ EMUD ข้อจำกัดในตัว C จะถูกมองข้ามไปในตัวของ ESE

ขั้นแรก เราสมมติให้ช่องสัญญาณไม่มีหน่วยความจำ ดังนั้น กระบวนการ ESE จะสามารถทำให้สำเร็จได้ในรูปแบบ chip-by-chip ยกตัวอย่างเช่น สมมติให้สังเกตที่ค่าของช่องสัญญาณเพียงหนึ่งช่อง $r(j)$ ที่ใช้ในหนึ่งครั้ง จะเห็นได้ชัดว่า ตัว ESE ไม่สามารถทำได้มากกว่านี้ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่ามันเป็นวิธีที่ง่ายมากๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก() เราสามารถเขียนได้เป็น

$$r(j) = h_k x_k(j) + \zeta_k(j) \quad (3.18)$$

โดยที่

$$\zeta_k(j) \equiv \sum_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^K h_{k'} x_{k'}(j) + n(j) \quad (3.19)$$

จะเป็นการบิดเบือนของข้อมูล (ที่รวม interference-plus-noise) ประกอบอยู่ใน $r(j)$ ที่สัมพันธ์กับ user-k จากข้อจำกัดกลางของทฤษฎี $\zeta_k(j)$ ก็คือค่าโดยประมาณของ Gaussian ดังนั้น $x_k(j)$ จะสามารถประมาณค่าได้จาก โดยเงื่อนไขว่าค่าเฉลี่ยและค่าการเปลี่ยนแปลงของ $\zeta_k(j)$ สามารถหาค่าได้

ต่อไปนี่จะเป็นขั้นตอนของ Algorithm ที่มี $E(\cdot)$ เป็นค่าเฉลี่ย และ $Var(\cdot)$ เป็นค่าการเปลี่ยนแปลง

เริ่มต้น : กำหนดให้ค่า $e_{DEC}(x_k(j)) = 0, \quad \forall k, j.$

กระบวนการหลัก :

$$E(x_k(j)) \leftarrow \tanh(e_{DEC}(x_k(j))/2), \quad \forall k, j.$$

$$Var(x_k(j)) \leftarrow 1 - (E(x_k(j)))^2, \quad \forall k, j.$$

$$E(r(j)) \leftarrow \sum_{k'=1}^K h_{k'} E(x_{k'}(j)), \quad \forall j.$$

$$Var(r(j)) \leftarrow \sum_{k'=1}^K |h_{k'}|^2 Var(x_{k'}(j)) + \sigma^2, \quad \forall j.$$

$$e_{ENB}(x_k(j)) \leftarrow 2h_k \cdot \frac{r(j) - E(r(j)) + h_k E(x_k(j))}{Var(r(j)) - |h_k|^2 Var(x_k(j))}, \quad \forall k, j.$$

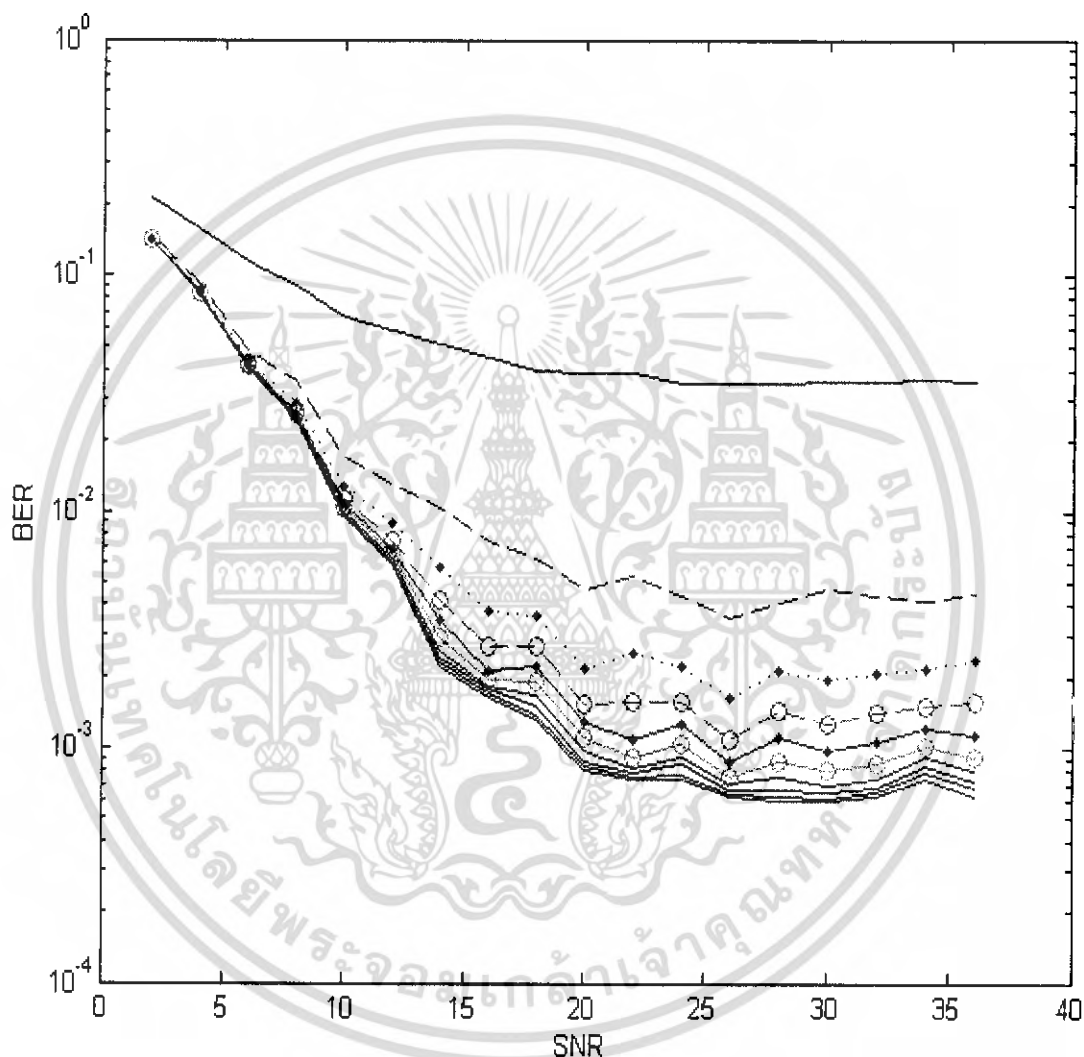
จากอัลกอริทึมข้างต้นนี้เป็นอัลกอริทึมที่เข้าใจได้ง่ายแล้วไม่ซับซ้อน

ค่าการคำนวณโดยมาตรฐานในข้างต้นนี้ (โดยที่ยังไม่รวม APP decoding of C) เป็นเพียงการบวกและการคูณ/chip/user ระบุถึงผลลัพธ์จากสมการ(4) เช่น $E(r(j))$ และ $Var(r(j))$ สามารถแบ่งได้กับทุก users ค่า/บิตข้อมูล/user เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงพร้อมกับแผ่ขยายความยาวของ code โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวน user K

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 รูปกราฟผลการทดลองSIMO(SNR = 36 dB)



รูปที่ 4.1 รูปกราฟผลของสัญญาณทางฝั่งภาครับ โดยมีจำนวน Iteration เท่ากับ 10 ครั้ง

จากการทดลอง กระทำอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของตัวแปรต่างๆดังนี้

- จำนวน User ในระบบ IDMA จำลอง เป็น 4 users
- จำนวนเสาอากาศทางภาคส่ง 1 เสาอากาศ
- จำนวนเสาอากาศทางภาครับ 2 เสาอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จำนวนสัญญาณ multipath ใน 1 layer เท่ากับ 1
- ความยาวของบิตข้อมูล เท่ากับ 260
- จำนวนรอบในการทำ Iterative เท่ากับ 10 รอบ
- ค่า Signal to Noise Ratio (SNR) มีค่าเป็น 36 dB

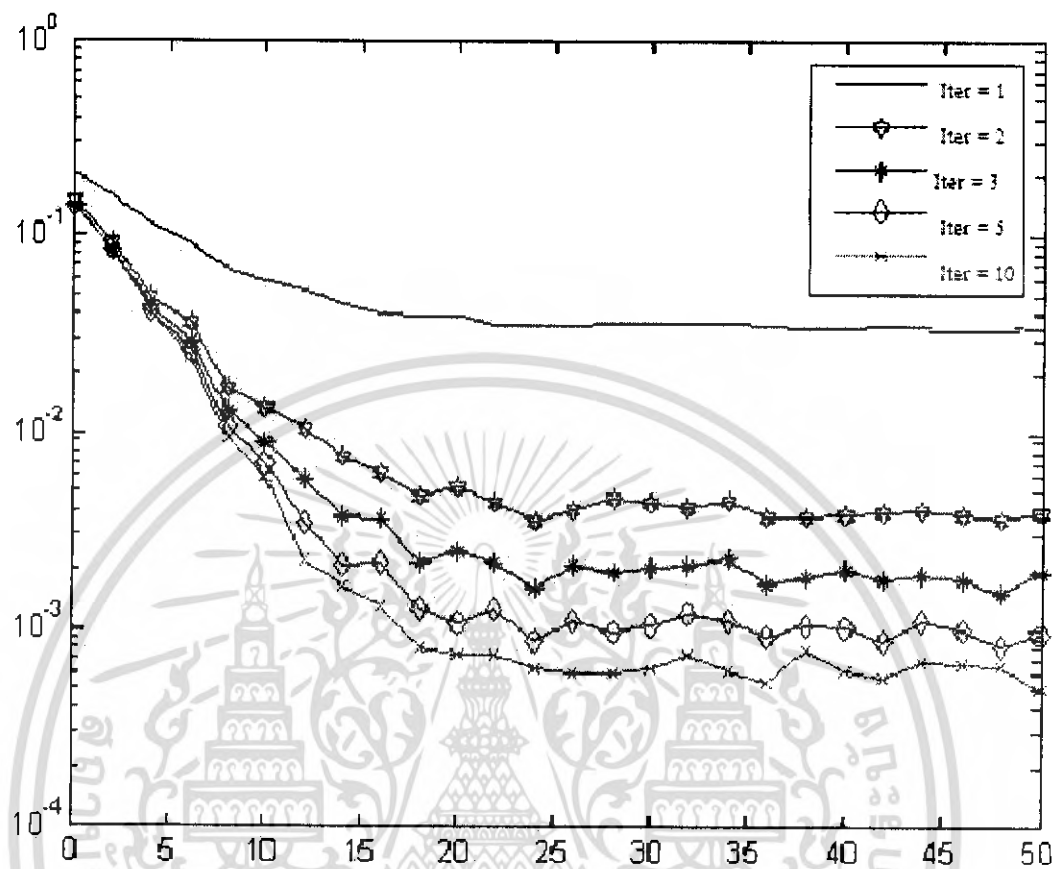
จากรูปกราฟที่แสดงผลการทดลอง กำหนดให้แกน x แสดงค่า SNR(dB) และแกน y แสดงค่า BER

เมื่อเราทำการประมวลผลโปรแกรม matlab ที่จำลองระบบ IDMA แล้วพบว่า เมื่อเราส่งสัญญาณไปทางภาครับ โดยที่ทางภาครับไม่ได้ทำการ Iterative สัญญาณที่ได้รับจะมีคุณภาพต่ำเนื่องจากสัญญาณจะมี BER อยู่ในระดับสูง ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลที่ได้รับทางภาครับมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในบิตข้อมูลอยู่ในระดับสูง สัญญาณจึงไม่มีความน่าเชื่อถือ

เมื่อระบบจำลอง IDMA ได้ทำ Iterative แล้วจะพบได้จากกราฟว่า จำนวน BER ลดลงตามจำนวนครั้งของการทำ Iterative นั่นหมายความว่า สัญญาณที่ได้รับทางภาครับมีสัญญาณรบกวนน้อยลง มีข้อผิดพลาดในบิตข้อมูลลดลง สัญญาณจึงมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

แต่เมื่อสังเกตจากกราฟผลการทดลองแล้วจะพบว่า เมื่อทำการ Iterative ไปถึงประมาณรอบที่ 7 ขึ้นไป สัญญาณมีขนาด BER ที่ลดลงต่ำมากและมีขนาดใกล้เคียงกันมาก

4.2 รูปกราฟผลการทดลองSIMO(SNR = 50 dB)



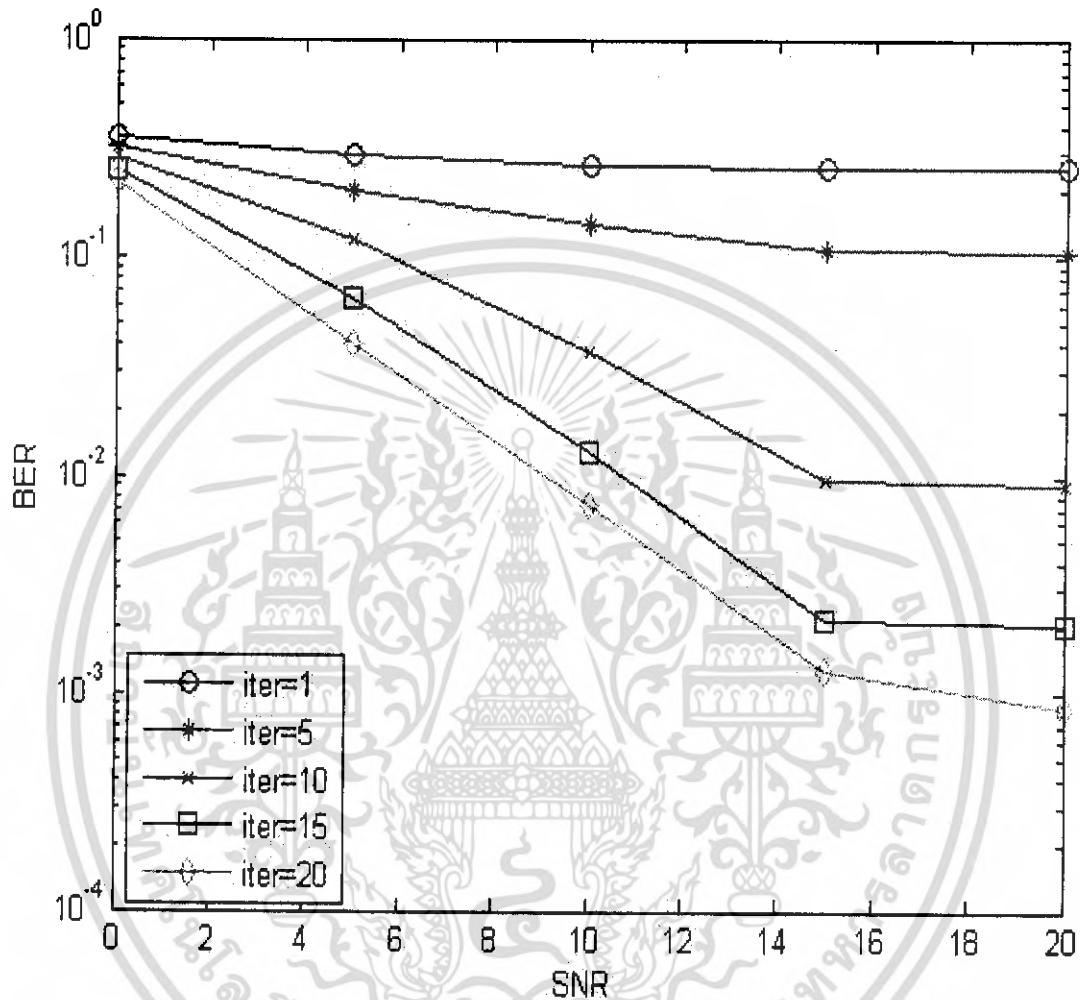
รูปที่4.2 รูปกราฟผลสัญญาณทางภาครับที่มีการทำ Iterative จำนวน 10ครั้งโดยมีค่าSNRเป็น 50 dB

ผลการทดลองนี้ กระทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกับผลการทดลองในรูปที่4.1 ด้านบน แตกต่างกันที่เพิ่มค่า Signal to noise ratio (SNR) เป็น 50 dB โดยที่แกน X คือค่า BER (Bit Error Rate) และแกน Y คือแกนที่แสดงค่า SNR โดยมีหน่วยเป็น เดซิเบล (dB) กราฟที่นำมาแสดงผลนี้ ได้แสดงถึงการวน Iterative ครั้งที่1 ครั้งที่ 2 ครั้งที่3 ครั้งที่5 และครั้งที่10 เพียง 5 เส้นกราฟเท่านั้น เพื่อความชัดเจนต่อการสังเกตผล

จากกราฟที่นำมาแสดงผลนี้ จะเห็นว่า เมื่อสัญญาณที่ส่งเข้ามาโดยที่ยังไม่ได้ผ่านการ Iterative สัญญาณมีค่า BER ที่สูงกว่าสัญญาณที่ได้ผ่านการวน iterative โดยแม้ผ่านการ Iterative ไปเพียงหนึ่งครั้ง ค่าBERก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แล้วยิ่งค่าSNR มากขึ้น ค่าBERก็ลดน้อยลง โดยเปรียบเทียบเส้นกราฟที่5 ซึ่งเป็นกราฟจากการวนIterative ครั้งที่10ในรูปที่ กับ รูปกราฟที่ ข้างต้น โดยเทียบที่เส้นกราฟที่10เช่นกัน จะเห็นได้ว่า ค่าBER ในการวน Iterativeครั้งที่10 ในรูปที่ จะต่ำกว่ารูปกราฟข้างบน จึงสามารถบอกได้ว่าสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองแบบMIMO



รูปที่ 4.3 เป็นรูปกราฟสัญญาณทางฝั่งภาครับ ที่มี Iterative จำนวน 20 ครั้ง โดยที่เป็นระบบ MIMO

การทดลองนี้ได้กระทำภายใต้ข้อจำกัดดังต่อไปนี้

- จำนวน User ในระบบ IDMA จำลองเท่ากับ 10 users
- จำนวนเสาอากาศที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ได้กำหนดให้เป็น 2 เสาอากาศ
- จำนวนเสาอากาศที่ใช้ในการรับสัญญาณ ได้กำหนดให้เป็น 2 เสาอากาศเช่นกัน
- จำนวนสัญญาณ multipath ใน 1 layer เท่ากับ 1
- ความยาวของ Data Sequence เป็น 260
- Iteration กำหนดให้เป็น 20 ครั้ง
- กำหนดให้ค่า SNR เป็น 25 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟที่ 4.3 ข้างต้น ได้แสดงถึงสัญญาณที่ได้ผ่านการวน Iterative ครั้งที่1, ครั้งที่5, ครั้งที่10, ครั้งที่15และครั้งที่20 ถ้าเปรียบเทียบในเชิงจำนวนครั้งการทำ Iteration เมื่อสัญญาณใน iterationครั้งที่1 จากรูปกราฟจะเห็นว่า BER อยู่ในระดับที่สูง เมื่อผ่านการ iteration ไปครั้งที่2 สัญญาณจะมีคุณภาพดีขึ้น และจะดีขึ้นตามจำนวนครั้งที่วนIteration โดยเมื่อถึงครั้งIterationที่20จะเห็นว่า สัญญาณมีค่าBERที่ลดลงมาต่ำมากเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ไม่ผ่านการทำ Iteration

แล้วเมื่อเปรียบเทียบในเชิงของค่าSNR จะเห็นว่ายิ่งค่าSNR เพิ่มมากขึ้น ปริมาณของBER จะลดต่ำลงจนแทบจะเป็นเชิงเส้นในช่วงSNR ที่ประมาณ 0-15 dB หลังจากนั้น ในการวนIteration ครั้งที่0จนถึงครั้งที่15ที่ค่าSNR 16-20 dB กราฟจะมีลักษณะเกือบจะเป็นกราฟเส้นตรง

แล้วถ้านำรูปที่4.2 เปรียบเทียบกับรูปที่4.3 แล้วจะเห็นว่า ในการส่งสัญญาณแบบส่งด้วยเสาอากาศหนึ่งเสา แล้วรับด้วยเสาอากาศ2เสาจะต้องใช้ค่าSNR ถึง 50dB จึงจะได้ค่าBERที่ต่ำลงจนถึงประมาณ 0.001 แต่ถ้าเป็นการส่งสัญญาณส่งด้วยเสาอากาศสองเสา และรับด้วยเสาอากาศสองเสา สัญญาณจะมีคุณภาพดีขึ้นโดยที่ใช้ค่า SNR แค่เพียง 25dBก็สามารถทำให้ได้ค่า BERที่ต่ำลงจนเหมือนกับกราฟรูปแรกที่ใช้ค่าSNR ถึง 50dB

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลการทดลองรูปที่ 4.1

จากการทดลอง จะเห็นได้ว่า เมื่อสัญญาณที่ส่งมายังฝั่งผู้รับยังไม่ได้ทำการ Iterative คุณภาพของสัญญาณอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดี เนื่องจากสัญญาณที่ได้รับนั้น ยังมีสัญญาณรบกวนร่วมอยู่ด้วยเป็นจำนวนมากซึ่งจะเห็นได้จากแกน y ซึ่งเป็นแกนที่แสดงถึงค่า BER แต่เมื่อได้ผ่านการ Iterative แล้ว จะพบว่า ค่า BER ของสัญญาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งหมายถึงว่า คุณภาพของสัญญาณดีขึ้น เพราะค่าสัญญาณรบกวนมีน้อยลง แต่เมื่อทำการ Iterative ไปถึงประมาณรอบที่ 7 จะพบว่ากราฟแต่ละเส้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก จนเกือบจะเป็นค่าเดียวกัน แสดงว่า เมื่อทำการ Iterative ไปถึงจุดๆ หนึ่ง คุณภาพของสัญญาณจะไม่สามารถปรับคุณภาพให้ดีขึ้นได้มากกว่านี้แล้ว

5.2 สรุปผลการทดลองรูปที่ 4.2

จากการทดลองรูปที่ 4.2 จะได้ว่า เมื่อสัญญาณส่งมาทางฝั่งผู้รับยังไม่ได้ผ่านการทำ Iterative ถึงแม้ค่า SNR จะสูงกว่าผลการทดลองรูปที่ 4.1 ก็ไม่ได้ทำให้ค่า BER ของสัญญาณทางภาครับมีค่าลดน้อยลง เมื่อสัญญาณได้ผ่านการ Iteration เพื่อเป็นการปรับลด error ที่เกิดจากการสัญญาณของ user อื่นที่ไม่เกี่ยวข้องแล้ว ตั้งแต่เส้นกราฟที่ 2 คุณภาพของสัญญาณก็ดีขึ้น เมื่อเทียบกับกราฟเส้นที่ 1 และถ้านำกราฟเส้นที่ 10 ซึ่งเป็นเส้นที่แทนการวน Iteration ครั้งที่ 10 มาเปรียบเทียบกับเส้นกราฟที่ 1 ซึ่งแทนสัญญาณที่ไม่ผ่านการวน Iteration จะเห็นความแตกต่างของค่า BER ที่ต่างกันพอสมควร

แนวโน้มของสัญญาณทางภาครับ ถึงแม้ค่า SNR จะเพิ่มขึ้นเป็น 50 dB คุณภาพของสัญญาณก็ไม่สามารถปรับค่า BER ให้ได้ต่ำกว่าประมาณ 10^{-3} ได้ ดังนั้น จึงสามารถเป็นข้อสรุปได้ว่า สัญญาณทางภาครับในระบบ IDMA ที่มี การส่ง-รับสัญญาณแบบ SIMO โดยกำหนดให้มีผู้ใช้งานระบบจำนวน 2 users นั้น สามารถปรับค่า BER ได้ดีที่สุดที่ $BER=10^{-3}$

5.3 สรุปผลการทดลองรูปที่ 4.3

จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ในการส่งสัญญาณแบบการส่งด้วยเสาอากาศ 2 เสาอากาศ และการรับสัญญาณด้วยเสาอากาศ 2 เสาอากาศแล้ว ค่า BER ของเส้นกราฟที่ 1 ซึ่งเป็นเส้นกราฟที่แสดงถึงสัญญาณที่ยังไม่ได้ผ่านการ Iteration มีค่าสูงกว่า ค่า BER ของสัญญาณที่ยังไม่ได้ผ่านการ Iteration ในการรับ-ส่งสัญญาณแบบ SIMO ในการทดลองข้างต้น ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนจากเสาอากาศที่เป็นตัวส่งสัญญาณอีกหนึ่งตัว เมื่อสัญญาณทางภาครับได้นำไปผ่านการวน Iteration แล้วในครั้งที่ 5 ซึ่งแสดงเป็นเส้นกราฟที่ 2 ในรูป 4.3 ค่า BER ก็ยังปรับลดลงมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อสัญญาณได้ผ่านการวน Iteration ครั้งที่ 10 ซึ่งแทนด้วยเส้นกราฟที่ 3 แล้ว ค่า BER ลดลงจากเส้นกราฟที่ 1 อย่างชัดเจน ซึ่งหมายความว่าสัญญาณมีคุณภาพดีขึ้น แล้วเมื่อผ่านการวน Iteration ไปถึงครั้งที่ 20 แล้ว สัญญาณทางภาครับก็สามารถปรับค่า BER ให้ลดลงได้ถึง 10^{-3} โดยที่ใช้ค่า SNR แค่เพียง 20 dB เมื่อเปรียบเทียบกับรูปกราฟข้างต้นที่สามารถปรับค่า BER ให้ลดลงมาได้ใกล้เคียงกันแต่ต้องใช้ค่า SNR ถึง 50 dB

ดังนั้น จึงสามารถสรุปจากการทดลองได้ว่า การรับ-ส่งสัญญาณแบบส่งสัญญาณด้วยหลายเสาอากาศและรับสัญญาณด้วยหลายเสาอากาศในระบบ IDMA ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าการส่งสัญญาณแบบส่งด้วยเสาอากาศ 1 เสาอากาศและรับสัญญาณด้วยหลายเสาอากาศ