

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อีควอไลเซอร์เชิงความถี่ในคลื่นพาหะเดี่ยวบนระบบ MIMO
FREQUENCY-DOMAIN EQUALIZATION
IN SINGLE CARRIER (SC) MIMO SYSTEM



โดย
นาย พลวัฒน์ ถ้วนสมบูรณ์
นางสาว พัชรินทร์ มนูญสัมฤทธิ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72674
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ย. 2550

b. 111 x 115 x
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FREQUENCY-DOMAIN EQUALIZATION
IN SINGLE CARRIER (SC) MIMO SYSTEM**



BY

MR. PALAWAT TOUNSOMBOON

MISS. PATCHARIN MANOONSUMRIT

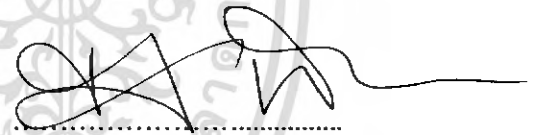
**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ อีควอไลเซอร์เชิงความถี่ในคลื่นพาหะเดี่ยวบนระบบ MIMO
ชื่อนักศึกษา นาย พลาวัฒน์ ถ้วนสมบูรณ์ รหัสประจำตัว 46010505
นางสาวพัชรินทร์ มนูญสัมฤทธิ์ รหัสประจำตัว 46010508
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ จักรี ทิฆมภาคย์วิศิษฐ์
รศ.ดร. กนก เจริญพงศ์เวช
ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา 2549

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



(อาจารย์ จักรี ทิฆมภาคย์วิศิษฐ์)
อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(รศ.ดร. กนก เจริญพงศ์เวช)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อีควอไลเซอร์เชิงความถี่ในคลื่นพาหะเดียวบนระบบ MIMO
ชื่อนักศึกษา	นาย พลาวัฒน์ ถ้วนสมบูรณ์ รหัสนักศึกษา 46010505 นางสาวพัชรินทร์ มนูญสัมฤทธิ์ รหัสนักศึกษา 46010508
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์จักรี ทิมภาคย์วิศิษฎ์ รศ. ดร. กนก เจริญระพงษ์เวช
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2549

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการเจริญเติบโตของระบบการสื่อสารไร้สายกระตุ้นความสนใจของนักวิจัย ในการศึกษาระบบการสื่อสารไร้สายแบบใหม่ๆ การเสนอ Space-time coding และการประยุกต์ใช้ สายอากาศหลายตัวที่สถานีส่งและสถานีรับ รวมทั้งอีควอไลเซอร์แบบความถี่เดียวได้เป็นแรงคล ใจในการทำวิจัยใหม่ในเรื่องเทคนิคอีควอไลเซชัน สำหรับช่องสัญญาณแบบ MIMO

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสมการในเชิงความถี่แบบความถี่พาหะเดียว โครงสร้างที่ นำเสนอใช้หลักการของการปรับค่าได้แบบวนซ้ำ ร่วมกับเทคนิคการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution) ในการลดและกำจัดสัญญาณรบกวนในระบบ เครื่องรับที่ออกแบบนั้นได้นำข้อดีของ การลดความซับซ้อนของวิธีการปรับค่าในเชิงความถี่มาใช้เพื่อลดความซับซ้อนของระบบที่ ออกแบบ ประสิทธิภาพของระบบที่คาดหมายจะต้องเหมือนกับประสิทธิภาพของระบบในเชิง ของเวลา (Time Domain)

ประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอจะถูกศึกษาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลอง สภาพการทำงาน of ระบบ

Thesis Title FREQUENCY-DOMAIN EQUALIZATION IN SINGLE CARRIER (SC)
MIMO SYSTEM

Student Mr. Palawat Tuansomboon ID. 46010505

Miss. Patcharin Manoonsumrit ID. 46010508

Advisor Asst. Prof. Chakree Teekapakvisit

Asst. Prof. Kanok Jenjirapongwaich

Graduate Level Bachelor Degree of Information Engineering

Department Information Engineering

Academic Year 2006

Abstract

Recently, the growth of wireless communications has encouraged researches to investigate a new wireless communication system. The introduction of space-time coding and application of antenna arrays at both transmitter and receiver including the single carrier equalization has encouraged new research on equalization techniques for Multiple-input Multiple-output (MIMO) channel.

In this thesis, frequency domain equalization in single carrier (SC) MIMO systems is proposed. The proposed scheme utilizes a joint frequency domain adaptive iterative and convolutional coding technique to suppress and cancel the interferences in the system. The receiver takes an advantage of the complexity reduction from the frequency domain adaptation to reduce the system computation complexity. The performance of the proposed frequency domain adaptation is expected to be similar to the performance of the time domain adaptation scheme.

The system performance of the proposed receiver is investigated by using the computer program simulation.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลาย ๆ ฝ่ายซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านที่มีส่วนร่วม ช่วยเหลือ และแนะนำในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ จักรี ทิฆมภคย์วิศิษฏ์ และ รศ. ดร. กนก เจริญพงศ์เวช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรที่ได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษา และข้อเสนอที่เป็นประโยชน์ จึงทำให้การทำปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการจัดทำ และตรวจสอบปริญญาบัตรจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้โอกาสและคอยให้กำลังใจเสมอมา
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงการนี้ ทางผู้เขียนขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

พัชรินทร์ มนูญสัมฤทธิ์
พลวัฒน์ ถ้วนสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิด	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 สถาปัตยกรรมของระบบ องค์ประกอบหลักๆ โดยรวมของโครงการ หรือรูปแสดง ระบบการทำงาน	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีระบบสื่อสาร	5
2.1.1 ชนิดของสัญญาณ	5
2.1.2 โมเดลของระบบสื่อสาร	5
2.1.2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยเซนนอน	6
2.1.2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน	7
2.2 เทคโนโลยีการมอดูเลชัน	9
2.3 สัญญาณรบกวน	11
2.3.1 สัญญาณรบกวนแบบ AWGN	11
2.4 หลักการพื้นฐานของวงจรรองแบบปรับตัวได้	12
2.4.1 วิธี Steepest Descent (Method of Steepest Descent)	12
2.4.2 ระเบียบวิธี LMS (Least-Mean-Square Algorithm)	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2.1 กระบวนการกรอง (Filtering Process)	19
2.4.2.2 กระบวนการปรับค่าสัมประสิทธิ์ (Adaptive Process)	19
2.4.3 ระเบียบวิธี Normalized LMS (Normalized LMS Algorithm)	20
2.4.4 ระเบียบวิธี Variable Step Size LMS (Variable Step Size LMS Algorithm)	21
2.5 Layered Space-Time (LST)	22
2.5.1 LST Transmitters	23
2.5.2 Iterative LST Receiver	28
2.6 การสลับตำแหน่ง (Interleave)	30
2.6.1 Block Interleave	31
2.6.2 Random (Pseudo-Random) Interleave	31
2.7 อัลกอริทึมถอดรหัส MAP (MAP Decoding Algorithm)	32
2.8 หลักการพื้นฐานของรหัสแก้ไขความผิดพลาด	36
2.9 รหัสคอนโวลูชัน (Convolution Code)	37
2.9.1 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน	37
2.9.2 ตัวอย่างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน	39
2.9.3 แผนภาพไดอะแกรมสถานะ (State Diagram)	41
2.9.4 ไดอะแกรมทรีวิส (Trellis Diagram)	43
บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน	45
3.1 โครงสร้างของระบบฝั่งส่ง	45
3.2 โครงสร้างของระบบฝั่งรับ	46
3.2.1 โครงสร้างของระบบฝั่งรับในเชิงเวลา	46
3.2.2 โครงสร้างของระบบฝั่งรับในเชิงความถี่	50
3.3 การกำหนดตัวแปรในระบบ	57
3.4 การหาประสิทธิภาพของระบบ	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	58
4.1 กราฟแสดงค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ที่มีการวนซ้ำ 1 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 2 เสา	59
4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่ที่มีการวนซ้ำ 1 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 2 เสา	60
4.3 กราฟแสดงค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ที่มีการวนซ้ำ 1 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 4 เสา	61
4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่ที่มีการวนซ้ำ 1 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 4 เสา	62
4.5 กราฟแสดงค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ที่มีการวนซ้ำ 8 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 2 เสา	63
4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่ที่มีการวนซ้ำ 8 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 2 เสา	64
4.7 กราฟแสดงค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ที่มีการวนซ้ำ 8 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 4 เสา	65
4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่ที่มีการวนซ้ำ 8 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 4 เสา	66
4.5 สรุปผลการทดลองของระบบ	67
4.6 เปรียบเทียบความซับซ้อนในการคำนวณของระบบในเชิงเวลาและเชิงความถี่	67
บทที่ 5 สรุป	67
5.1 สรุปการพัฒนาโครงการ	68
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค	68
5.3 ข้อจำกัดของโครงการที่พัฒนา	68
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อ	68
บรรณานุกรม	69

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก	3
รูปที่ 2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยแซนนอน	6
รูปที่ 2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน	7
รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างการ Modulation และ Demodulation	9
รูปที่ 2.4 แสดงรูปสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบ ASK , FSK และ PSK	10
รูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตแบบ BPSK	11
รูปที่ 2.6 วงจรกรองแบบทรานเวอร์ส	13
รูปที่ 2.7 วงจรกรองแบบปรับตัวได้แบบทรานเวอร์ส N แท้ป	16
รูปที่ 2.8 VLST architecture	23
รูปที่ 2.9 HLST architecture with a single code	24
รูปที่ 2.10 HLST architecture with a separate code in each layer	25
รูปที่ 2.11 DLST and TLST transmitter.	26
รูปที่ 2.12 Iterative HLST receiver with single decoder.	28
รูปที่ 2.13 Iterative HLST receiver with separate decoders.	29
รูปที่ 2.14 Iterative DLST and TLST receiver.	29
รูปที่ 2.15 การสลับตำแหน่ง (a) Block Interleave, (b) Random Interleave	31
รูปที่ 2.16 แสดงการทำงานของกระบวนการเดินทางหน้าและย้อนกลับ	35
รูปที่ 2.17 ประเภทของรหัสควบคุมความผิดพลาด	37
รูปที่ 2.18 โครงสร้างวงจรเข้ารหัสคอนไวลูชัน	38
รูปที่ 2.19 วงจรเข้ารหัสคอนไวลูชัน ที่ค่า R เท่ากับ $1/2$ และค่า K เท่ากับ 3	39
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสข้อมูล 11011 โดยใช้วงจรเข้ารหัสรูปที่ 2.19	40
รูปที่ 2.21 แสดงไดอะแกรมสถานะของวงจรรูปที่ 2.20	42
รูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นและคำรหัสที่ได้	43
รูปที่ 2.23 แสดงไดอะแกรมทรีวิส (Trellis Diagram)	43
รูปที่ 2.24 แสดงไดอะแกรมทรีวิสของการเข้ารหัสคอนไวลูชันในตัวอย่าง 2.9.2	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 โครงสร้าง Layered space-time transmitter	45
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของวงจรปรับค่าได้แบบวนซ้ำ LSTC ในเชิงเวลา	46
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของการวนซ้ำที่ตัวรับ MMSE	47
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของวงจรปรับค่าได้แบบวนซ้ำ LSTC ในเชิงของความถี่	51
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล จากเสาอากาศส่ง 1 รับ 2 ในเชิงเวลา	59
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจาก เสาอากาศส่ง 1 รับ 2 ในเชิงความถี่	59
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 2	60
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล จากเสาอากาศส่ง 1 รับ 4 ในเชิงเวลา	61
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล จากเสาอากาศส่ง 1 รับ 4 ในเชิงความถี่	61
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 4	62
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล จากเสาอากาศส่ง 2 รับ 2 ในเชิงเวลา	63
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล จากเสาอากาศส่ง 2 รับ 2 ในเชิงความถี่	63
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 2	64
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล จากเสาอากาศส่ง 2 รับ 4 ในเชิงเวลา	65
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล จากเสาอากาศส่ง 2 รับ 4 ในเชิงความถี่	65
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล ในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 4	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสถานะจากการเข้ารหัสโดยใช้วงจรรูปที่ 2.19

หน้า

41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิด

ปัจจุบันระบบการสื่อสารได้พัฒนามาจนถึงยุค 3G ระบบสามารถรองรับการส่งข้อมูลแบบมัลติมีเดียและมีการให้บริการต่างๆซึ่งระบบการสื่อสารในยุคก่อนๆทำไม่ได้ การพัฒนาระบบสื่อสารในยุค 3G นี้ การรับส่งข้อมูลผ่านตัวกลาง โครงข่ายจะต้องมีความฉลาดมากขึ้นมีการเปิดบริการต่าง ๆ จะเปิดให้ผู้ใช้งานมากขึ้น รวมไปถึงสมรรถนะและคุณภาพของการบริการก็จะมีมากขึ้นด้วย และในอนาคตระบบสื่อสารยุค 4G จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้บริการในสถานะแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งผู้ใช้สามารถใช้บริการรับส่งข้อมูลได้ แม้จะอยู่ในรถยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ และจะมีอัตราการรับส่งข้อมูลเป็น 50-100 Mbps ขึ้นไป นอกจากนี้ระบบการสื่อสารยุค 4G จะสนับสนุนการบริการต่าง ๆ ที่มีลักษณะการบริการทั้งแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร (Symmetrical / Asymmetrical Services) การบริการแบบสมมาตร คือ ข้อมูลจะมีการรับส่งกันทั้งสองฝ่ายในปริมาณที่เท่าๆกัน ส่วนการบริการแบบไม่สมมาตร คือ ปริมาณการส่งข้อมูลของฝ่ายหนึ่งมีมากกว่าอีกฝ่ายหนึ่ง เช่น การใช้บริการอินเทอร์เน็ต ซึ่งส่วนมากเราจะรับข้อมูลมากกว่าส่งข้อมูล ส่วนเรื่องคุณภาพของการให้บริการที่มีลักษณะแบบเวลาจริง (Real time) ก็จะดีขึ้น อีกทั้งยังสนับสนุนการบริการที่มีลักษณะแบบแพร่กระจายข้อมูลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วยด้วยเหตุนี้เอง จึงทำการศึกษาเทคนิคที่น่าสนใจที่จะใช้ในการพัฒนาระบบการสื่อสารในอนาคต ซึ่งก็คือ ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple Input Multiple Output (MIMO)) ซึ่งใช้เทคโนโลยีที่มีการกระจายสัญญาณเป็นหลายๆเส้นทาง (Multipath) โดยจะเข้ารหัสสัญญาณและทำการส่งต่อมายังตัวส่งซึ่งจะมีเสาอากาศเป็นตัวส่งและกระจายสัญญาณ ไปยังเครื่องรับสัญญาณ โดยเทคโนโลยีนี้จะช่วยแก้ปัญหาข้อขัดข้องในระบบการสื่อสารไร้สายและทำให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นด้วย

ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกเป็นการส่งแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ซึ่งผู้ใช้จะใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่ในระบบ หลักการของช่องสัญญาณแบบหลายทางเข้าหลายทางออกจะถูกระบุและแสดงให้เห็นว่าเสาอากาศที่ใช้ส่งหลายตัวจะทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณขึ้น (Co-channel interference) เนื่องจากระบบนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า Layered Space-Time coding (LST)

เทคนิคของ LST นั้นจะมีสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียง ซึ่งจะไปจำกัดประสิทธิภาพของระบบ ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ จะทำได้โดยใช้เครื่องรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำที่รวมการจับสัญญาณและถอดรหัสสัญญาณไว้ด้วยกัน ซึ่งมี 2 แบบ คือ แบบแรกจะประกอบด้วย *Minimum Mean Square Error* (MMSE) เป็นตัวจับสัญญาณกับอัลกอริทึม soft-output Viterbi (SOVA) เป็นตัวถอดรหัส ส่วนแบบที่สองจะใช้ *Parallel Interference Cancellation* (PIC) เป็นตัวจับสัญญาณ กับ *Maximum a Posteriori* (MAP) เป็นตัวถอดรหัส การทำงานของทั้งสองแบบจะขึ้นอยู่กับจำนวนของช่องสัญญาณและสัญญาณรบกวนข้างเคียงซึ่งต้องกำหนดค่าที่แน่นอนของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (*Signal to Noise Ratio* (SNR)) ภายใต้อัตราสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่สมบูรณ์แบบ

ในปริยายานิพนธ์นี้ เครื่องรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำ (*Adaptive iterative TLSTC*) ซึ่งมีตัวจับสัญญาณและอัลกอริทึมการถอดรหัสเข้าไว้ด้วยกันนั้น ไม่ต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณที่สมบูรณ์แบบ เหมือนในเครื่องรับที่ปรับค่าไม่ได้แบบวนซ้ำ (*non-adaptive iterative*) ดังนั้นเครื่องรับจึงไม่ต้องใช้เมตริกซ์ผกผัน (*inversion matrix*) ในการคำนวณ ดังนั้นผลที่ได้ก็คือ ความซับซ้อนในการคำนวณของเครื่องรับนั้นจะน้อยกว่าเครื่องรับที่ปรับค่าไม่ได้แบบวนซ้ำ ยิ่งไปกว่านั้นเครื่องรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำยังมีการซับซ้อนและกำจัดสัญญาณรบกวนจากข้างเคียงอีกด้วย

ซึ่งเราจะเน้นเรื่องประสิทธิภาพการกำจัดสัญญาณรบกวนและความสามารถในการตรวจจับของโครงสร้างของเครื่องรับที่ปรับค่าได้แบบวนซ้ำที่จะให้ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น

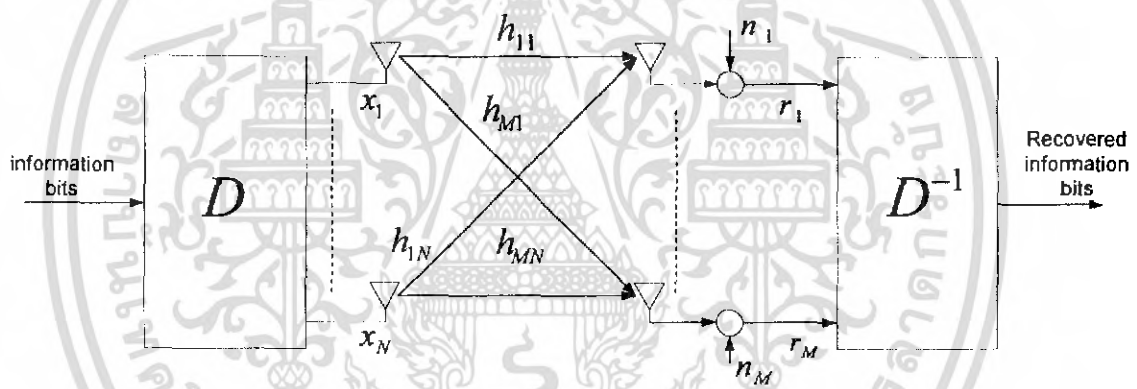
1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพื้นฐานการทำงานของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก
- 1.2.2 เข้าใจอัลกอริทึมพื้นฐานที่ใช้ในระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกในเชิงของเวลา (*Time-Domain*) และเชิงความถี่ (*Frequency-Domain*)
- 1.2.4 สามารถพัฒนาโปรแกรมจำลองระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่ใช้การทำงานของเครื่องรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกในเชิงของเวลา (*Time-Domain*) และเชิงความถี่ (*Frequency-Domain*)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาการทำงานของเครื่องรับปรับค่าได้แบบวนกลับในเชิงเวลาโดยใช้ อัลกอริทึม LMS
- 1.3.2 แก้ไขและเพิ่มเติมโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบ
- 1.3.3 ศึกษาการทำงานของเครื่องรับปรับค่าได้แบบวนกลับในเชิงความถี่
- 1.3.4 แก้ไขและเพิ่มเติมโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบให้อยู่ในรูปเชิงความถี่
- 1.3.5 เปรียบเทียบความซับซ้อนและประสิทธิภาพ ในเชิงของเวลาและในเชิงความถี่

1.4 สถาปัตยกรรมของระบบ องค์ประกอบหลักๆ โดยรวมของโครงการ หรือรูปแสดง ระบบการทำงาน



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

1.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

- 1.6.1 ศึกษารูปแบบการทำงานโดยรวมของเครื่องรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำแบบ LMS ในเชิงของเวลา
- 1.6.2 แก้ไขและเพิ่มเติมโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบให้อยู่ในเชิงเวลา โดยใช้โปรแกรม MATLAB
- 1.6.3 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการจำลอง
- 1.6.4 ศึกษารูปแบบการทำงานโดยรวมของเครื่องรับปรับค่าได้แบบวนกลับแบบ LMS ในเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.5 แก้ไขและเพิ่มเติมโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบให้อยู่ในเชิงความถี่โดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.6.6 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองและทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ในเชิงของเวลาและเชิงความถี่ทั้งทางด้านประสิทธิภาพและความซับซ้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีระบบสื่อสาร

2.1.1 ชนิดของสัญญาณ

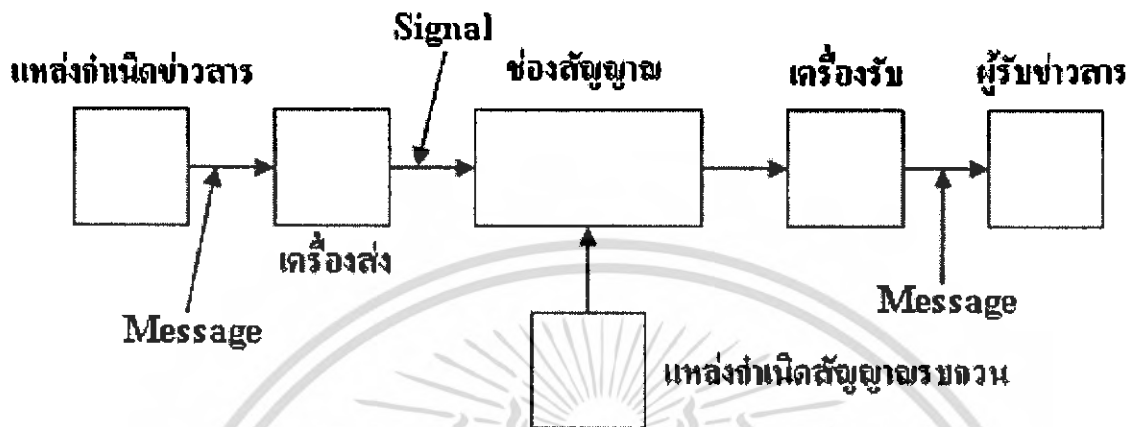
ชนิดของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารนั้น เมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดของสัญญาณแล้วอาจแบ่งออกอย่างกว้าง ๆ เป็น 3 แบบด้วยกัน คือ

- สัญญาณอนาล็อก
- สัญญาณดิจิทัล
- สัญญาณรบกวน

สัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณที่ระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งต่างจากสัญญาณดิจิทัลเพราะสัญญาณดิจิทัลจะมีจำนวนระดับสัญญาณเป็น 2 ระดับ หรือเป็นจำนวนเต็มที่มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง ตัวอย่างของสัญญาณอนาล็อกก็คือ สัญญาณเสียงและสัญญาณภาพ เป็นต้น ส่วนสัญญาณดิจิทัลนั้นมีแหล่งกำเนิดจากวงจรอิเล็คทรอนิกส์แบบดิจิทัลที่ใช้อยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยทั่วไป เครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์รอบข้างทั้งหลายจะทำงานโดยใช้สัญญาณดิจิทัลทั้งหมด กล่าวคือ สัญญาณตัวอักษรและสัญญาณควบคุมทั้งหลายจะอยู่ในรูปสัญญาณดิจิทัลทั้งหมด นอกจากนั้นสัญญาณดิจิทัลอาจจะถูกสร้างมาจากสัญญาณอนาล็อก เช่นสัญญาณดิจิทัลในระบบ PCM (Pulse Code Modulation) สำหรับสัญญาณรบกวนนั้นเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างสุ่ม และจะเกิดอยู่ในระบบสื่อสารอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.1.2 โมเดลของระบบสื่อสาร

การส่งข่าวสารคือการส่งผ่านข่าวสารจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบสื่อสารได้อย่างถูกต้องและตรงประเด็นแชนนอน (C.E.Shannon) ได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารขึ้นเป็นคนแรกใน ค.ศ.1948 โดยแบ่งระบบสื่อสารออกเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ตามหน้าที่ และต่อมาในปี ค.ศ.1961 ฟาโน (R.M.Fano) ได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารที่ละเอียดขึ้นไปกว่าของแชนนอนและเป็นโมเดลที่ยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน



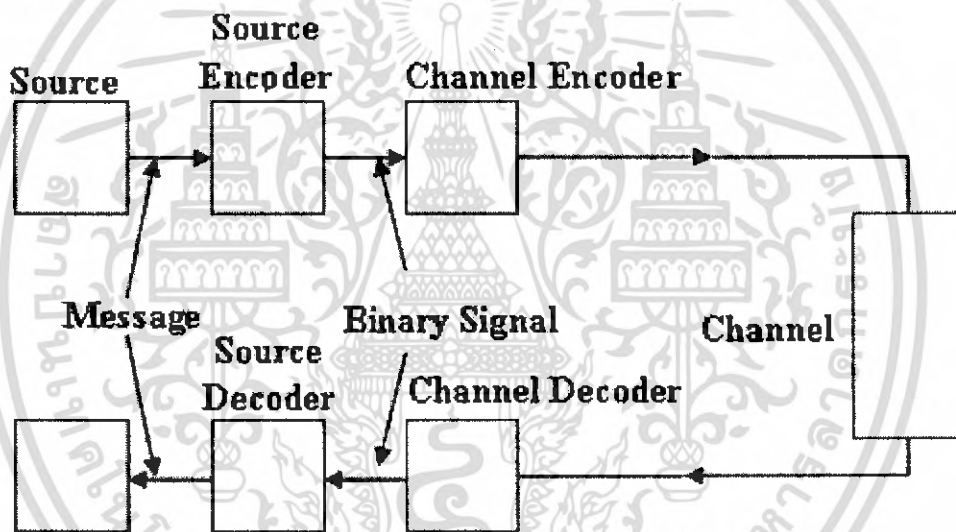
รูปที่ 2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยแชนนอน

2.1.2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยแชนนอน

แชนนอนได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารไว้ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 โดยแบ่งระบบสื่อสารออกเป็นส่วนประกอบหลัก ๆ คือ แหล่งกำเนิดข่าวสาร (Information Source) เครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) ช่องสัญญาณ (Channel) เครื่องรับสัญญาณ (Receiver) และผู้รับข่าวสารปลายทาง (Destination) แหล่งกำเนิดข่าวสารจะเป็นแหล่งที่ให้กำเนิดข่าวสาร (Message) ซึ่งข่าวสารนั้น อาจจะเป็นตัวอักษรที่เรียงกันเป็นคำและมีความหมาย หรือเป็นเสียงพูด เป็นต้น ช่องสัญญาณนั้นก็หมายถึงตัวกลางที่จะให้สัญญาณผ่านไปซึ่งจะหมายถึงตั้งแต่ออกจากเครื่องส่งจนถึงเครื่องรับสัญญาณรบกวนจะเข้าสู่ช่องสัญญาณในระหว่างทาง สำหรับเครื่องส่งนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงข่าวสารให้อยู่ในรูปสัญญาณที่เหมาะสมที่จะส่งผ่านช่องสัญญาณ แชนนอนได้เรียกขั้นตอนนี้ว่า “การเข้ารหัส” (Coding) สัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นนี้เมื่อส่งผ่านไปตามช่องสัญญาณก็จะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาปะปน และก็จะส่งผ่านถึงเครื่องรับในสภาพที่สัญญาณรบกวนปะปนอยู่ เครื่องรับนั้นก็จะทำหน้าที่ย้อนขั้นตอนของเครื่องส่ง คือ แปลงสัญญาณที่รับเข้ามาได้กลับไปเป็นข่าวสาร ในขั้นตอนดังกล่าวนี้ถ้าสัญญาณที่รับเข้ามาเป็นสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ เครื่องรับก็อาจจะทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบ คือ แปลงสัญญาณให้กลับมาอยู่ในรูปของข่าวสารได้อย่างถูกต้อง

แต่ในสภาพที่มีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่นั้นเครื่องรับที่ดีก็คือเครื่องรับที่แปลงสัญญาณกลับมาเป็นข่าวสาร โดยมีการผิดพลาดน้อยที่สุด

ขั้นตอนในการแปลงสัญญาณกลับมาเป็นข่าวสารนี้ เรียกว่า “การถอดรหัส” (Decoding) ในระบบการสื่อสารที่คืนั้นการเข้ารหัสจะต้องทำให้สัญญาณที่ได้มีความสามารถในการต่อต้านสัญญาณรบกวนสูง ในขณะที่เดียวกันก็ต้องเอื้ออำนวยต่อการถอดรหัสที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดต่ำสุด การเข้ารหัสแบบที่ใช้รหัสแก้ความผิดพลาด (Error Correcting Code) ที่ใช้ในระบบสื่อสารข้อมูลก็จัดว่าเป็นการเข้ารหัสที่เอื้ออำนวยให้การถอดรหัสมีความผิดพลาดน้อยที่สุด



รูปที่ 2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน

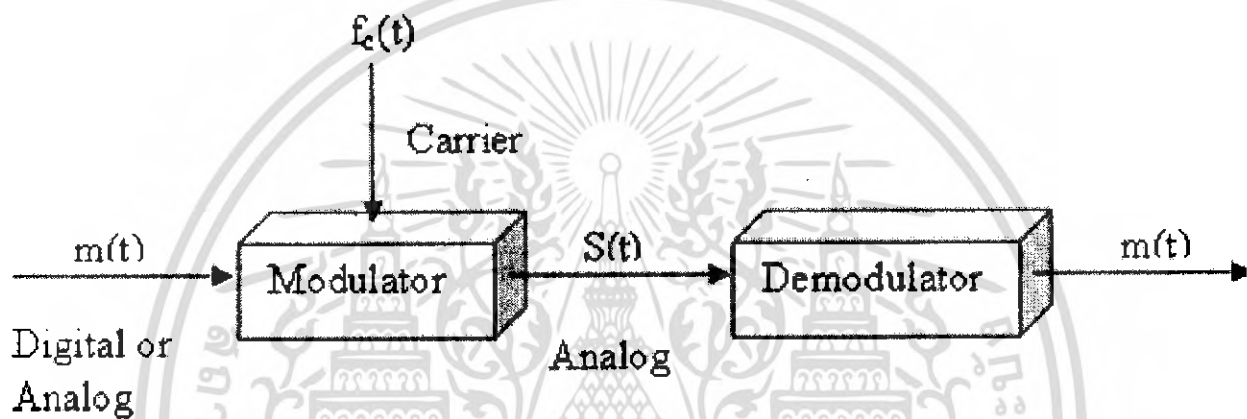
2.1.2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน

ในปี ค.ศ.1961 ฟาโนได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารโดยดัดแปลงโมเดลของแชนนอนและเรียกโมเดลนี้ว่าโมเดลของระบบสื่อสารข้อมูล รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของโมเดลดังกล่าวนี้ ลักษณะเฉพาะของโมเดลก็คือ ฟาโนได้แยกส่วนที่เป็นเครื่องส่งในโมเดลของแชนนอนออกเป็นเครื่องเข้ารหัสข่าวสาร (Source encoder) และเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Encoder) ในขณะเดียวกันก็แยกเครื่องรับในโมเดลของแชนนอนเป็น เครื่องถอดรหัสช่องสัญญาณ (Channel Decoder) และเครื่อง

ดอครหัสข่าวสาร (Source Decoder) นอกจากนั้นสัญญาณในช่วงระหว่างเครื่อง
 เข้ารหัสข่าวสารและเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณก็พิจารณาในรูปของสัญญาณ ไบนารี
 ดังนั้นเครื่องเข้ารหัสข่าวสารก็จะต้องทำการแปลงข่าวสารให้ออกมาในรูปของ
 สัญญาณไบนารี ต่อจากนั้นเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณก็จะจัดการกับสัญญาณไบนารี
 นั้นให้อยู่ในรูปสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับส่งผ่านช่องสัญญาณต่อไป การที่ฟาโนแบ่ง
 เครื่องส่งและเครื่องรับออกเป็น 2 ส่วนดังกล่าวนี้ ก็เพราะเล็งเห็นว่าการเข้ารหัส
 ข่าวสารและการดอครหัสข่าวสารนั้นเป็นขั้นตอนที่ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของความ
 น่าจะเป็นของการเกิดของข่าวสาร ในขณะที่การเข้ารหัสช่องสัญญาณและการ
 ดอครหัสช่องสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของช่องสัญญาณที่ส่งผ่าน
 สัญญาณไป การแยกเป็น 1 ส่วนอย่างชัดเจน เช่นนี้ทำให้เห็นได้เด่นชัดขึ้นว่า ในส่วน
 ของการเข้ารหัสข่าวสารนั้นเมื่อเลือกวิธีที่เหมาะสมกับความน่าจะเป็นของการเกิด
 ข่าวสารก็จะทำให้เราสามารถใช้เวลาโดยเฉลี่ยของสัญญาณไบนารีที่สั้นที่สุดใน
 การส่งข่าวสารได้ นั่นคือมีโอกาสอัดข่าวสารได้ สำหรับในส่วนของ การเข้ารหัส
 ช่องสัญญาณนั้นก็หมายถึงเราจะสามารถเลือกรูปแบบของการส่งสัญญาณที่เหมาะสม
 กับช่องสัญญาณที่มีอยู่เพื่อให้สัญญาณที่ได้จากเครื่องดอครหัสช่องสัญญาณปลายทาง
 มีการผิดพลาดน้อยที่สุด สรุปคือโมเดลของฟาโนนี้ได้แยกหน้าที่หลัก 2 ประการของ
 ระบบสื่อสารคือ ประการแรก การส่งข่าวสารอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงให้
 เป็นหน้าที่ของเครื่องเข้ารหัสข่าวสาร และอีกประการหนึ่งคือ การส่งสัญญาณให้มี
 ความถูกต้องสูงให้กับเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณ การแบ่งหน้าที่กันอย่างชัดเจนนี้
 นอกจากจะมีประโยชน์ทางด้านทฤษฎีแล้วยังมีประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบ
 ระบบสื่อสารในภาคปฏิบัติ นอกจากนั้นการที่ฟาโนเรียกโมเดลของระบบสื่อสารที่
 เสนอขึ้นนี้ว่าโมเดลของระบบสื่อสารข้อมูล ก็เป็นเพราะว่าฟาโนได้แสดงให้เห็นว่า
 ถึงแม้ข่าวสารที่ต้องการส่งจะเป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่อง เช่น สัญญาณเสียง และ
 สัญญาณภาพ เป็นต้น เครื่องเข้ารหัสข่าวสารก็จะสามารถแปลงให้สัญญาณนั้นอยู่ใน
 รูปของสัญญาณไบนารีเสมอ ดังนั้นโมเดลของฟาโนนี้จึงเป็นโมเดลที่ถูกใช้โดยทั่วไป
 ในขณะนี้

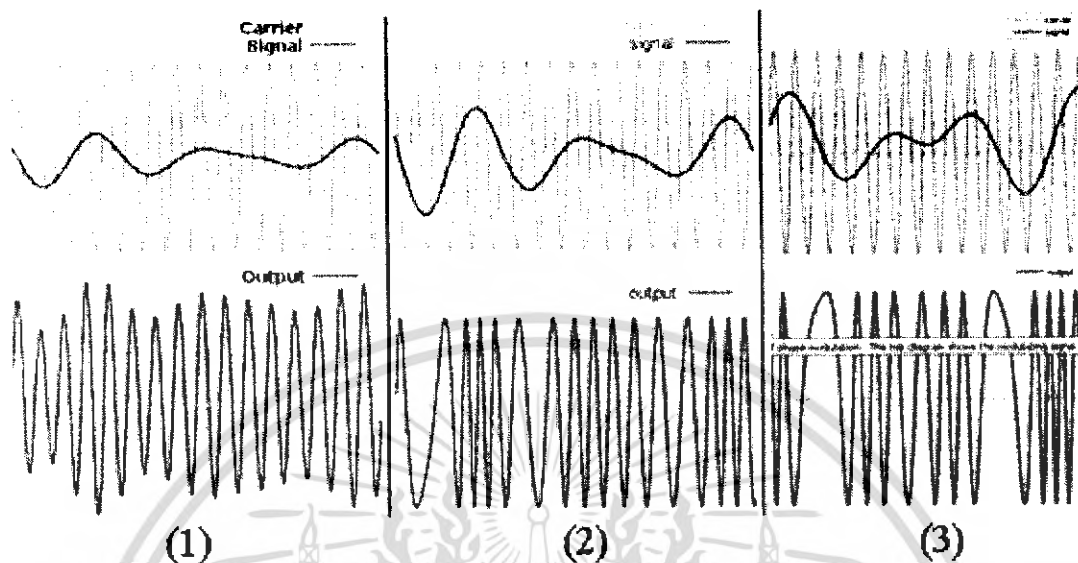
2.2 เทคโนโลยีการมอดูเลชัน (Modulation)

การมอดูเลตสัญญาณ หมายถึง การนำสัญญาณไฟฟ้าทางด้านต้นทาง ผสมเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ เพื่อฝากข่าวสารที่มีอยู่ในสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ซึ่งมีความถี่สูงกว่ามาก ๆ ดังนั้น การมอดูเลตจึงเป็นการแปลงความถี่ของสัญญาณให้อยู่ในความถี่สูง เพื่อความสะดวกในการส่งสัญญาณออกไป จากรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงตัวอย่างการมอดูเลตและดีมอดูเลต



รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างการ Modulation และ Demodulation

จากรูปสัญญาณ $m(t)$ อาจเรียกว่า Baseband Signal ผ่านกระบวนการมอดูเลต จะได้สัญญาณ $S(t)$ เรียกว่า Modulated Signal หรือ Bandpass เทคโนโลยีการมอดูเลต มี 3 แบบ คือ การมอดูเลตแบบแอมพลิจูดชิฟท์คีย์อิง (Amplitude Shift Keying) การมอดูเลตแบบเฟรควเอนซีชิฟท์คีย์อิง (Frequency-Shift Keying) และ การมอดูเลตแบบเฟสชิฟท์คีย์อิง (Phase-Shift Keying)



รูปที่ 2.4 แสดงรูปสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบ ASK , FSK และ PSK

จากรูปที่ 2.4 ส่วนบนจะแสดงรูปของสัญญาณพาห้และสัญญาณข่าวสาร และส่วนล่างเป็นรูปของสัญญาณที่ได้หลังจากทำการมอดูเลตแล้ว โดยรูปที่ (1) เป็นการมอดูเลตแบบแอมพลิจูดซีฟท์ คีย์อิง (ASK) คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะขึ้นอยู่กับระดับแอมพลิจูดของสัญญาณข่าวสาร รูปที่ (2) เป็นการมอดูเลตแบบเฟรเควนซีซีฟท์คีย์อิง (FSK) คือ ความถี่ของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณข่าวสาร โดยแอมพลิจูดของสัญญาณพาห้จะไม่มีเปลี่ยนแปลง และรูปที่ (3) เป็นการมอดูเลตแบบเฟสซีฟท์คีย์อิง (PSK) คือ เฟสของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะเปลี่ยนไปตามระดับของสัญญาณข่าวสาร โดยแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณพาห้จะไม่มีเปลี่ยนแปลง

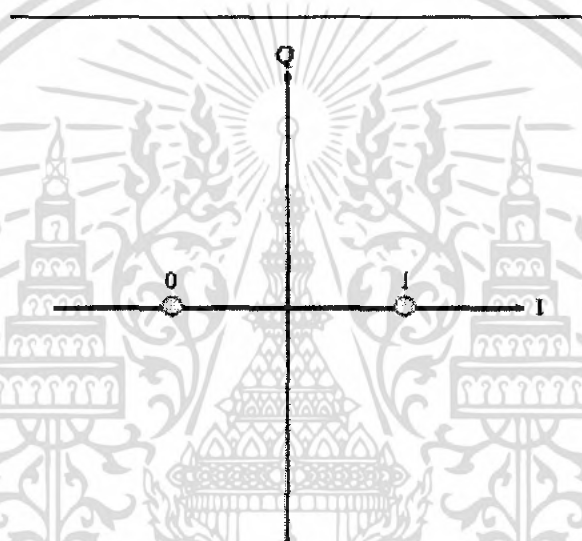
สำหรับการมอดูเลชันข้อมูลดิจิทัลที่มีระดับของสัญญาณเพียง 2 ระดับ นั้นรูปแบบการมอดูเลตที่ใช้โดยมากจะเป็นแบบ ไบนารีเฟสซีฟท์คีย์อิง (Binary Phase Shift Keying) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการมอดูเลตแบบเฟสซีฟท์คีย์อิง โดยที่การมอดูเลตแบบไบนารีเฟสซีฟท์คีย์อิง (BPSK) นั้นจะแสดงสัญญาณไบนารีด้วยสัญญาณ 2 เฟส ซึ่งเฟสทั้งสองมีมุมต่างกัน 180° ดังรูปที่ 2.5 โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{BPSK} \quad S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary 0} \end{cases} = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) \\ -A \cos(2\pi f_c t) \end{cases} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้ฟังก์ชัน $d(t)$ เป็น Discrete Function โดยจะมีค่าเป็น +1 แทน บิต 1 และ -1 แทน บิต 0 จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ ดังนี้

$$\text{BPSK} \quad S(t) = Ad(t)\cos(2\pi f_c t) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตแบบ BPSK

2.3 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอในระบบสื่อสาร และจะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ด้วย ทั้งนี้สัญญาณรบกวนเกิดจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อยู่ เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์และ ไดโอด เป็นต้น ล้วนเป็นต้นกำเนิดของสัญญาณรบกวนทั้งสิ้น นอกจากนี้สัญญาณรบกวนยังเกิดจากการรบกวนจากภายนอก (Interference) อีกด้วย

2.3.1 สัญญาณรบกวนแบบ AWGN

สัญญาณรบกวนแบบ AWGN คือ สัญญาณรบกวนแบบที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในรูปของสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

และมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

$$F_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(\lambda-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} d\lambda$$

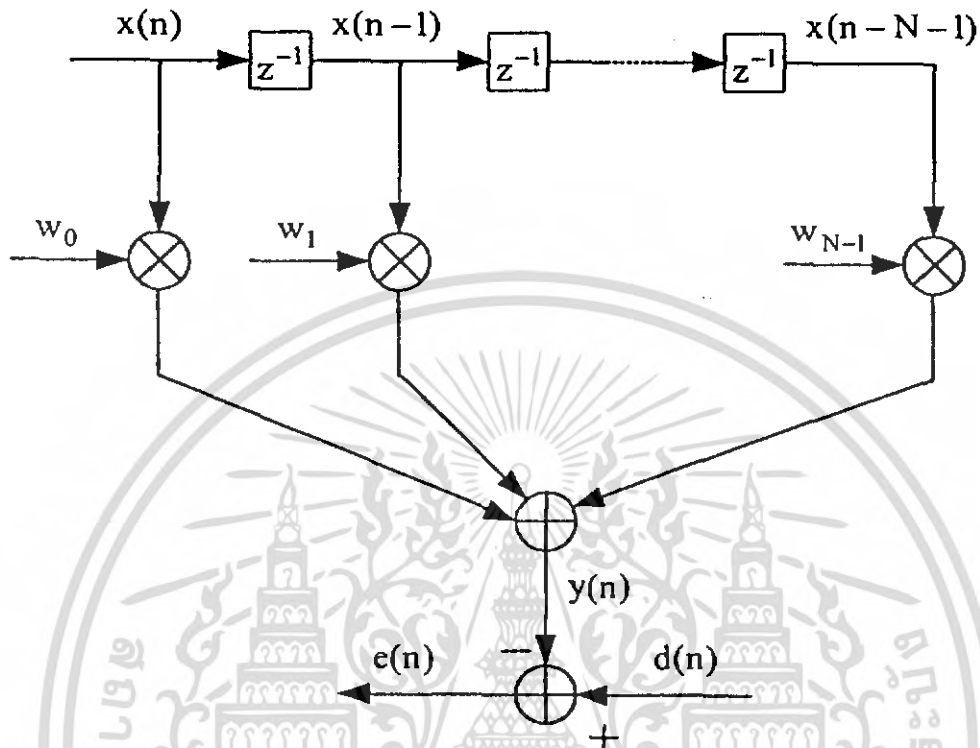
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{\frac{(x-\bar{x})}{\sigma}} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \quad (2.4)$$

2.4 หลักการพื้นฐานของวงจรรองแบบปรับตัวได้

วงจรรองพื้นฐานแบบปรับตัวได้ (Adaptive Filtering) ได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในงานประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และระบบควบคุม ทั้งนี้เพราะ ความสามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะ (Characteristics) ประจำตัวของระบบให้สอดคล้องกับสัญญาณที่รับเข้ามาได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจะสามารถทำงานกับสัญญาณที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Nonstationary) ซึ่งเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง ในทางปฏิบัติ วงจรรองแบบปรับตัวได้นั้นแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ๆ คือ วงจรรองแบบปรับตัวได้เชิงเส้น และวงจรรองแบบปรับตัวได้ไม่เชิงเส้น

2.4.1 วิธี Steepest Descent (Method of Steepest Descent)

วิธี Steepest Descent เป็นกรรมวิธีสำหรับปรับค่าน้ำหนักถ่วงของวงจรรองแบบปรับตัวได้ เพื่อให้เข้าสู่ผลตอบที่ต้องการ วิธีหนึ่งซึ่งได้รับความนิยม วิธี Steepest Descent ใช้ในการทำซ้ำหรือวิธีการปรับตัวเองในการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักถ่วงของวงจรรองที่เล็กทีละน้อยในทิศทางที่ลดค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์มากที่สุด โดยการปรับค่าน้ำหนักถ่วง



รูปที่ 2.6 วงจรกรองแบบทรานเวอร์ส

จากรูปที่ 2.5 อินพุตของวงจรกรองคือ $x(n)$ ผลตอบที่ต้องการคือ $d(n)$ ซึ่งสมมติเป็นลำดับค่าจริง ค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรอง w_0, w_1, \dots, w_{N-1} สมมติให้เป็นค่าจริง ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ตามลำดับดังนี้

$$w = [w_0 \quad w_1 \quad \dots \quad w_{N-1}]^T \quad (2.5)$$

และ

$$x(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-N+1)]^T \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้เอาต์พุตของวงจรรองเป็น

$$y(n) = w^T x(n) = x^T(n)w \quad (2.7)$$

สัญญาณผิดพลาด $e(n)$ คือผลต่างระหว่างค่าตอบที่ต้องการ $d(n)$ และเอาต์พุตของวงจรรอง $y(n)$

$$e(n) = d(n) - w^T x(n) = d(n) - x^T(n)w \quad (2.8)$$

โดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์เป็น

$$\xi = E[e^2(n)] \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.8) เมื่อยกกำลังสองจะได้

$$e^2(n) = d^2(n) - 2w^T x(n)d(n) + w^T x(n)x^T(n)w \quad (2.10)$$

หาค่าความคาดหวังของสมการ (2.10) ได้ดังนี้

$$\xi = E[e^2(n)] = E[d^2(n)] - 2w^T E[x(n)d(n)] + w^T E[x(n)x^T(n)]w \quad (2.11)$$

นิยามให้เวกเตอร์ p คือ สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผลตอบที่ต้องการ $d(n)$ ซึ่งเป็นสเกลาร์ กับเวกเตอร์อินพุตของวงจรรอง $x(n)$

$$p = E[x(n)d(n)] = [p_0 \ p_1 \ \dots \ p_{N-1}]^T \quad (2.12)$$

และนิยามให้เมตริกซ์อัตโนมัติของอินพุตเป็น

$$R = E[x(n)x^T(n)] = \begin{bmatrix} r_{0,0} & r_{0,1} & \cdots & r_{0,N-1} \\ r_{1,0} & r_{1,1} & \cdots & r_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{N-1,0} & r_{N-1,1} & \cdots & r_{N-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

จากค่า p และ R ที่นิยามไว้เราสามารถเขียนสมการของค่ากำลังสองเฉลี่ยในสมการที่ (2.11) ได้ดังนี้

$$\xi = E[e^2(n)] = E[d^2(n)] - 2w^T p + w^T R w \quad (2.14)$$

จากสมการนี้ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ ซึ่งมีรูปร่างเป็นพื้นผิวพาราโบลาหงาย การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองเพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด ก็คือ การวิ่งวนไปตามพื้นที่ผิวนี้นจนถึงจุดที่ต่ำที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยการหาค่าเกรเดียนต์ ∇ ของฟังก์ชันจุดประสงค์ ดังนี้

$$\nabla \xi = \left[\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial w_0} \quad \frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial w_1} \quad \cdots \quad \frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial w_n} \right] = -2p + 2Rw \quad (2.15)$$

เมื่อให้ค่า $\nabla \xi = 0$ จะได้เวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองที่เหมาะสม w_0 ซึ่งเรียกว่า “Wiener Weight Vector”

$$w_0 = R^{-1}p \quad (2.16)$$

ตามวิธี Steepest Descent สามารถหาค่าเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของวงจรรองใหม่ได้ดังนี้

$$w(n+1) = w(n) - \mu \nabla_n \xi \quad (2.17)$$

โดย $w(n)$ เป็นเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของวงจร ที่การทำซ้ำเกิดครั้งที่ n

μ เป็นค่าช่วงก้าว

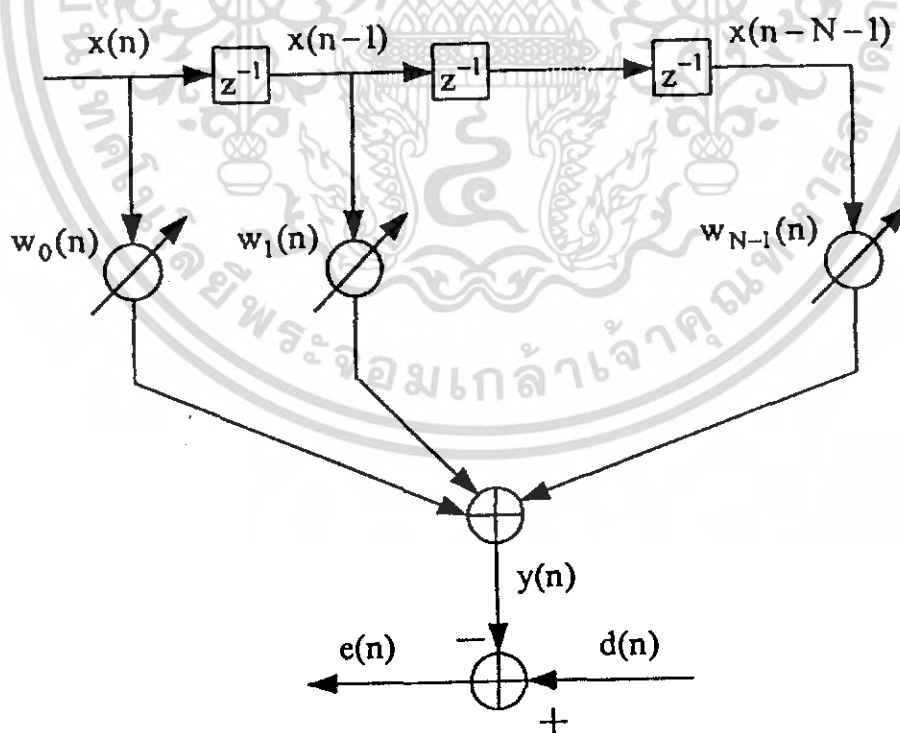
$\nabla_n \xi$ เป็นเวกเตอร์ของค่าเกรเดียนต์ของ ξ ที่ $w = w(n)$

2.4.2 ระเบียบวิธี LMS (Least-Mean-Square Algorithm)

ระเบียบวิธี LMS นี้จัดอยู่ในตระกูลวิธี Stochastic Gradient ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \text{เวกเตอร์} \\ \text{สัมประสิทธิ์ของวงจร} \\ \text{กรองที่ปรับค่าแล้ว} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{เวกเตอร์} \\ \text{สัมประสิทธิ์ของ} \\ \text{วงจรกรองเดิม} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{ค่าช่วงก้าว} \\ \text{สำหรับ} \\ \text{การประมาณ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{เวกเตอร์} \\ \text{สัญญาณเข้า} \\ \text{ของวงจรกรอง} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{ค่าผิดพลาด} \\ \text{จากการ} \\ \text{ประมาณ} \end{bmatrix}$$

ระเบียบวิธี LMS จะใช้ข้อมูลที่มีอยู่สำหรับประมาณค่าเกรเดียนต์ที่ช่วงเวลาใดๆ ของวิธี Steepest Descent ระเบียบวิธี LMS จะใช้ค่าผลคูณของเวกเตอร์สัญญาณกับค่าความผิดพลาดเป็นค่าประมาณของเกรเดียนต์เวกเตอร์จริง



รูปที่ 2.7 วงจรกรองแบบปรับตัวได้แบบทรานเวอร์ส N แทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 แสดงวงจรแบบปรับค่าได้แบบทรานเวอร์ส N แท้ป อินพุตของวงจรกรองคือ $x(n)$ ผลตอบที่ต้องการคือ $d(n)$ และจะได้เอาต์พุตของวงจรกรองเป็น

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i) \quad (2.18)$$

สัญญาณผิดพลาด $e(n)$ คือผลต่างระหว่างคำตอบที่ต้องการ $d(n)$ และเอาต์พุตของวงจรกรอง $y(n)$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.19)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองหรือค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $w_0(n), w_1(n), \dots, w_{N-1}(n)$ สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยเวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง $w(n)$ คือ

$$w(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad \dots \quad w_{N-1}(n)]^T \quad (2.20)$$

ระเบียบวิธีที่ปรับค่าได้ (Adaptive Algorithm) โดยทั่วไปมีจุดประสงค์เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองให้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุด เมื่อให้อินพุตของวงจรกรอง $x(n)$ และผลตอบที่ต้องการ $d(n)$ เป็น Statistically Stationary คือ มีค่าไม่ขึ้นกับเวลาและให้ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ระเบียบวิธี LMS เป็นวิธีการในทางปฏิบัติในการหาค่าประมาณใกล้เคียงของผลเฉลยดังกล่าวในเวลาจริง (Real Time) โดยไม่ต้องคำนวณฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation Function) และไม่ต้องหาเมตริกซ์ผกผัน สามารถปรับค่าเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของวงจรกรองได้ดังนี้

$$w(n+1) = w(n) - \mu \nabla e^2(n) \quad (2.21)$$

72674

โดย μ คือค่าช่วงก้าว (Step Size) และ ∇ เป็นการกระทำของเกรเดียนต์นิยามโดย

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial w_0} \quad \frac{\partial}{\partial w_1} \quad \dots \quad \frac{\partial}{\partial w_{N-1}} \right]^T \quad (2.22)$$

ที่ตำแหน่ง i ของเวกเตอร์เกรเดียนต์ $\nabla e^2(n)$

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial w_i} = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w_i} \quad (2.23)$$

แทนสมการ (2-18) ในสมการ (2-23) และเนื่องจาก $d(n)$ ไม่ได้ขึ้นกับ w_i จะได้

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial w_i} = -2e(n) \frac{\partial y(n)}{\partial w_i} \quad (2.24)$$

แทน $y(n)$ จากสมการ (2-18) จะได้

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial w_i} = -2e(n)x(n-i) \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2-22) และ (2-24) จะได้

$$\nabla e^2(n) = -2e(n)x(n) \quad (2.26)$$

เมื่อ $x(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-N+1)]^T$ แทนสมการ (2-26) ในสมการ (2-21)

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระเบียบวิธี LMS ประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 2 กระบวนการ ดังนี้

2.4.2.1 กระบวนการกรอง (Filtering Process)

- กำหนดผลตอบของวงจรกรองแบบทรานเวอร์สได้

เอาต์พุตของวงจรกรอง :

$$y(n) = w^T(n)x(n) \quad (2.28)$$

- กำหนดหาค่าผิดพลาดในการประมาณได้

ค่าผิดพลาดในการประมาณ :

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.29)$$

2.4.2.2 กระบวนการปรับค่าสัมประสิทธิ์ (Adaptive Process)

ทำการปรับสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองอย่างอัตโนมัติตามค่าผิดพลาดในการประมาณ ที่หาได้จากกระบวนการกรอง ดังสมการ

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (2.30)$$

ค่าเกรเดียนต์เวกเตอร์ $\nabla \zeta$ ในวิธีของ Steepest Descent สามารถประมาณได้ด้วย $e(n)x(n)$ หรือกล่าวได้ว่า Expectation Operator ได้ถูกนำออกไปจากสมการในวิธี Steepest Descent ซึ่งการประมาณเกรเดียนต์เวกเตอร์ โดยการละ Expectation Operator นี้ทำให้เกิดผลตามมา คือ ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองแต่ละครั้งจะได้รับผลจากเกรเดียนต์นอยส์ ดังนั้นการคำนวณโดยระเบียบวิธี LMS จะมีการเลื่อนไหวอย่างสุ่มรอบๆค่าต่ำสุดของพื้นผิวความผิดพลาด หรือถ่วงเข้าสู่ค่าเฉลี่ยแทนที่จะถ่วงเข้าสู่จุดต่ำสุดอย่างแท้จริง

เนื่องจากระเบียบวิธี LMS ใช้กระบวนการป้อนกลับในการทำงาน ดังนั้นเราจึงต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบด้วย ซึ่งเกณฑ์ที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพนี้คือ

$$\zeta(n) \rightarrow \zeta(\infty) \text{ เมื่อ } n \rightarrow \infty$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\xi(n)$ คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของระเบียบวิธี LMS ที่เวลา n และค่าที่สถานะอยู่ตัวของระเบียบวิธี LMS $\xi(\infty)$ เป็นค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยกำลังสองจะลู่เข้าสู่ค่าที่สถานะอยู่ตัวเมื่อเป็นไปตามเกณฑ์นี้ สำหรับระเบียบวิธี LMS นั้น ค่าช่วงก้าว μ ที่เหมาะสมซึ่งจะไปตามเงื่อนไขเกี่ยวกับโครงสร้างเจาะจง (Eigenstructure) ของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของอินพุตจะทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองลู่เข้าตามเกณฑ์ดังกล่าวได้

ความแตกต่างระหว่างค่าที่สถานะอยู่ตัว $\xi(\infty)$ และค่าต่ำที่สุด ξ_{\min} ที่ได้จากผลเฉลี่ย Wiener เรียกว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยส่วนเกิน (Excess Mean-Squared Error) $\xi_{ex}(\infty)$ ความแตกต่างนี้แสดงถึงสิ่งที่ต้องสูญเสียไปในกระบวนการปรับสัมประสิทธิ์วงจรรองโดยใช้ระเบียบวิธี LMS แทนที่จะใช้วิธี Steepest Descent

การปรับแก้ผิด (Misadjustment : M) คือ อัตราส่วนระหว่าง $\xi(\infty)$ กับ ξ_{\min} เป็นค่าที่แสดงว่า ผลตอบที่สถานะอยู่ตัวของระเบียบวิธี LMS อยู่ห่างจากผลเฉลี่ยของ Wiener มากน้อยแค่ไหนและสามารถกำหนดค่าการปรับแก้ผิดนี้ให้มีค่ามากน้อยตามที่ต้องการได้ โดยขึ้นอยู่กับช่วงก้าวที่ใช้ในระเบียบวิธี LMS สำหรับค่าช่วงก้าวต่ำๆ นั้น กระบวนการปรับจะดำเนินไปค่อนข้างช้าและผลจากเกรเดียนต์สัญญาณรบกวนของสัมประสิทธิ์วงจรรองจะถูกกรองออกไปมากซึ่งจะส่งผลในการลดการปรับแก้ผิดด้วย แต่ถ้าใช้ช่วงก้าวสูงๆ กระบวนการนี้จะเร็วขึ้นแต่การปรับแก้ผิดจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นั่นคือระเบียบวิธี LMS นี้เราจำเป็นต้องเลือกระหว่างความถูกต้องของผลลัพธ์หรือความเร็วในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ ดังนั้นการใช้ระเบียบวิธี LMS เราต้องให้ความสนใจกับช่วงก้าวเป็นอย่างมากเพราะค่าช่วงก้าวที่ใช้ในระเบียบวิธี LMS นี้จะมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองด้วยเหตุนี้จึงมีผู้พัฒนาวิธีการใหม่ๆ ให้มีการปรับค่าช่วงก้าวนี้ในขณะที่กระบวนการกำลังดำเนินการเพื่อให้ผลตอบของวงจรรองใช้เวลาลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องเร็วขึ้นและมีความถูกต้องมากขึ้นด้วย

2.4.3 ระเบียบวิธี Normalized LMS (Normalized LMS Algorithm)

วิธีการ normalized LMS (NLMS) เป็นวิธีการที่ดัดแปลงมาจากระเบียบวิธี LMS โดยนำเอาสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่อินพุตของวงจรรอง และทำการปรับค่า Normalized ของค่าพารามิเตอร์ช่วงก้าว ซึ่งจะให้ค่าเสถียรและการลู่เข้าของการปรับตัวจะให้ผลที่ดี พิจารณาสมการ LMS ดังนี้

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu(n)e(n)x(n) \quad (2.31)$$

เมื่อค่าพารามิเตอร์ $\mu(n)$ เปลี่ยนแปลงตามเวลา การปรับค่า $\mu(n)$ เพื่อให้ขนาดของความผิดพลาดมีค่าต่ำที่สุดสมการ

$$e^+(n) = d(n) - w^T(n+1)x(n) \quad (2.32)$$

แทนสมการที่ (2-31) ในสมการที่ (2-32) จะได้

$$e^+(n) = (1 - 2\mu(n)x^T(n)x(n))e(n) \quad (2.33)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ค่า $\mu(n)$ เป็น

$$\mu(n) = \frac{1}{2x^T(n)x(n)} \quad (2.34)$$

แทนสมการ (2-34) ในสมการ (2-31) จะได้

$$w(n+1) = w(n) + \frac{1}{x^T(n)x(n)} e(n)x(n) \quad (2.35)$$

สมการ (2-35) เป็น NLMS recursion และเมื่อนำมารวมกับสมการที่ (2-18) และ (2-19) จะเรียกวิธีการนี้ว่า ระเบียบวิธีแบบ NLMS

2.4.4 ระเบียบวิธี Variable Step Size LMS (Variable Step Size LMS Algorithm)

ค่าช่วงก้าว μ สามารถใช้ในการควบคุมสมรรถนะของระเบียบวิธี LMS แต่เนื่องจากความต้องการอัตราการลู่เข้าของระเบียบวิธี LMS ที่เร็ว ซึ่งจะทำให้ค่าช่วงก้าวมีค่ามากแต่ค่าความผิดพลาดก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งในการปรับแก้ผิด (Misadjustment) นั้นค่าช่วงก้าวต้องมีค่าเล็กๆ ดังนั้นจึงได้มีการเสนอ ระเบียบวิธี Variable Step Size LMS (VSLMS) ขึ้น เพื่อที่จะได้อัตราการลู่เข้าที่เร็ว และมีความผิดพลาดต่ำ

หลักการทำงานของ VSLMS จะอยู่บนพื้นฐานของ LMS ซึ่งจะทำการปรับเปลี่ยนค่าช่วงก้าวให้มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถเขียนสมการที่ (2-23) ได้ใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$w_i(n+1) = w_i(n) + 2\mu_i(n)e(n)x(n-1) \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.36)$$

เมื่อ $w_i(n)$ เป็นสมาชิกตัวที่ i ของเวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรอง $w(n)$ และ $\mu_i(n)$ เป็นค่าช่วงก้าวที่เวลา n การปรับแก้ช่วงก้าว $\mu_i(n)$ สามารถทำได้ดังนี้ เทอมเกรเดียนต์ของ stochastic $g_i(n) = e(n)x(n-i)$ เป็นตัวตรวจสอบความสำเร็จของระเบียบวิธี และ $\mu_i(n)$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทอมต่อมาไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านบวกหรือด้านลบ เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อวงจรรองปรับตัวได้ยังไม่รู้เข้า ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองปรับตัวได้จะรู้ค่าที่เหมาะสมเมื่อค่าเฉลี่ยของเทอมเกรเดียนต์ของ stochastic มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ค่าช่วงก้าว $\mu_i(n)$ ของระเบียบวิธี VLSMS สามารถปรับได้โดยสมการต่อไปนี้

$$\mu_i(n) = \mu_i(n-1) + \rho \operatorname{sgn}[g_i(n)] \operatorname{sgn}[g_i(n-1)] \quad (2.37)$$

เมื่อ ρ เป็นพารามิเตอร์ของช่วงก้าวที่มีค่าน้อยๆ ในสมการ (2-37) ถ้าตะฟังก์ชัน sgn จะได้สมการของช่วงก้าวใหม่เป็น

$$\mu_i(n) = \mu_i(n-1) + \rho g_i(n) g_i(n-1) \quad (2.38)$$

จากสมการ (2-32) เขียนในรูปเวกเตอร์ได้เป็น

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu(n)e(n)x(n) \quad (2.39)$$

2.5 Layered Space-Time (LST)

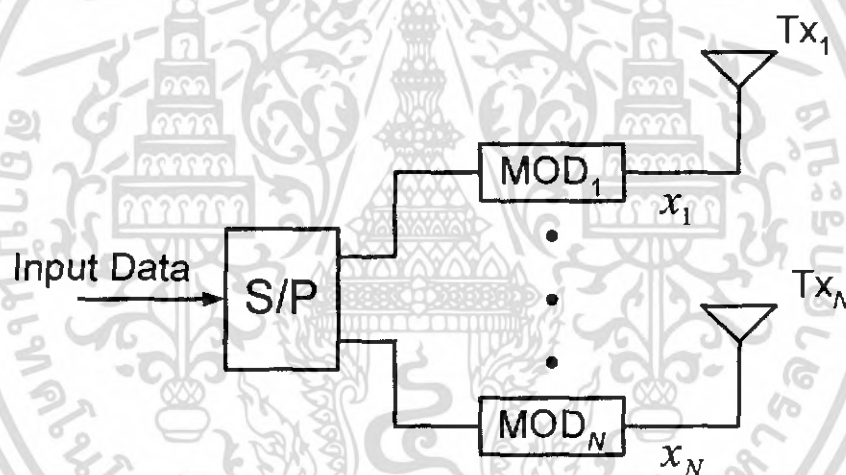
Space-time trellis codes จะมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีจำนวนบิตที่ใช้ในการส่งมากขึ้น ทำให้อัตราการส่งข้อมูลลดลง ลักษณะของวิธีการนี้ คือมันจะจัดการกับสัญญาณหลายมิติที่อยู่ในเชิงของเวลา โดยใช้การทำงานแบบมิติเดียว วิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับเทคนิคการทำงานของสัญญาณที่มีกำลังงานสูงที่เครื่องรับ ในสถาปัตยกรรมที่นำเสนอ นั้นจำนวนของข้อมูล n_T ที่ถูกส่งมาพร้อมกันที่ความถี่เดียวกัน โดยจะใช้เสาอากาศที่ส่งจำนวน n_T และเสาอากาศที่ฝั่งรับจำนวน n_R กระบวนการที่ใช้ในการแยกสัญญาณคือการขยับขยับและการกำจัดสัญญาณรบกวน สัญญาณที่ถูกแยกออกมาจะถูกถอดรหัสโดยใช้อัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กอลิทึมคอนเวนชันแนล (conventional decoding) ซึ่งจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการถอดรหัสแบบ maximum likelihood decoding ความซับซ้อนของฝั่งรับแบบ LST จะสูงขึ้นเช่นเดียวกับอัตราการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตามในการนำเสนอนี้จำนวนของเสาอากาศที่ฝั่งรับ แทนด้วย n_R จะต้องเท่ากับหรือมากกว่าจำนวนเสาอากาศที่ฝั่งส่ง

2.5.1 LST Transmitters

สถาปัตยกรรม LST นั้นมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับคำรหัสควบคุมความผิดพลาด (error control coding) และการมอดูเลตสัญญาณ โครงสร้างที่ยังไม่ได้เข้ารหัสของ LST แบบ vertical layered space-time (VLST) หรือ vertical Bell Laboratories layered space-time (VBLAST) จะแสดงในรูปที่ 2.8

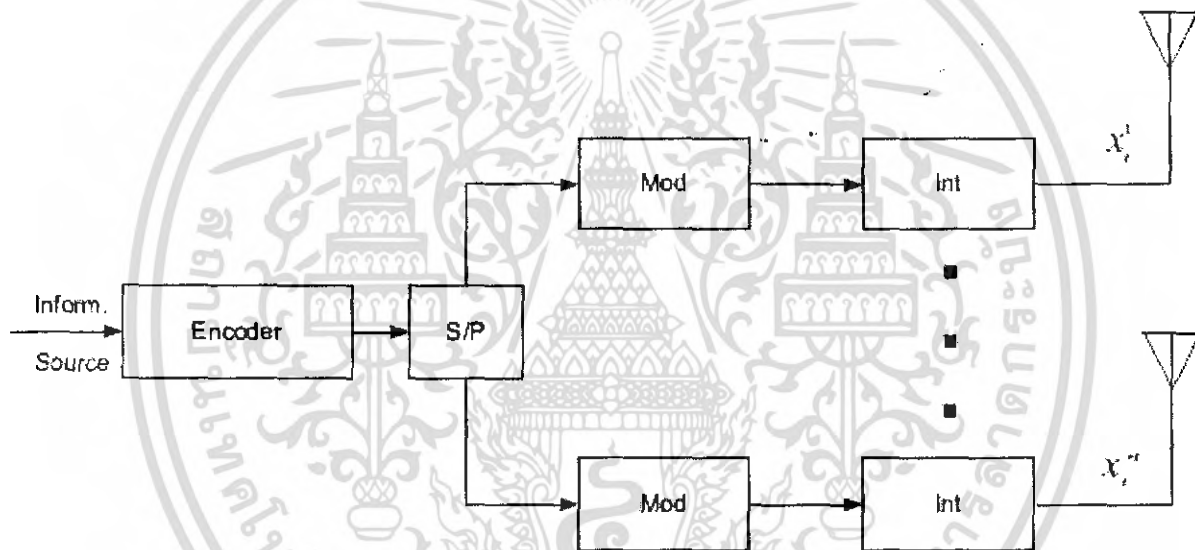


รูปที่ 2.8 VLST architecture

ลำดับของข้อมูลที่เข้ามา จะแทนด้วย c ซึ่งจะถูกแยกสัญญาณออกในขั้นแรก (first demultiplexed) ในรูปของ n_T sub-stream โดยแต่ละตัวจะเป็นผลจากการถูกมอดูเลตจาก M -level modulation scheme และจะถูกส่งไปที่เสาอากาศ โดยแต่ละ sub-stream จะแบ่งออกเป็นชั้นๆ สัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ฝั่งส่ง (transmission matrix) แทนด้วย X ซึ่งจะประกอบด้วย n_T แถวและ L คอลัมน์ ซึ่ง L เป็นความยาวบล็อกฝั่งส่ง (transmission block length) เมตริกซ์ฝั่งส่งที่คอลัมน์ i th จะแทนด้วย x_i ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้ว $x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{n_T}$ โดย $i = 1, 2, \dots, L$ ณ เวลา t ฝั่งส่งจะ

ส่งคอดั้มท์ที่ i th จากเมตริกซ์ฝั่งส่งค่าแรกจากเสาอากาศแต่ละตัว นั่นก็คือเมตริกซ์ฝั่งส่ง x'_i ที่ถูกส่งจากเสาอากาศที่ i ณ เวลา t .

โครงสร้างแนวตั้ง (Vertical structure) เป็นการส่งลำดับของคอดั้มท์เมตริกซ์ในช่วงเวลา (space-time domain) กระบวนการส่งโดยทั่วไปจะถูกรวมโดยบล็อกคอนเวนชันแนล (Conventional Block) หรือ รหัสคอนเวนชันแนล 1 มิติ (Conventional one-dimensional codes) เพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ ถ้าเป็น 1 มิติ จะอยู่ในโดเมนสเปซ (space domain) ขณะที่รหัสเหล่านี้จะมีหลายมิติในเชิงของเวลา



รูปที่ 2.9 HLST architecture with a single code

สถาปัตยกรรมแบบ *horizontal layered spaced-time* (HLST) ลำดับการส่งข้อมูลจะถูกเข้ารหัสก่อนโดยช่องสัญญาณ จากนั้นจะถูกแยกเป็น n_T sub-streams ซึ่งแต่ละ sub-streams จะถูกมอดูเลตและถูกสลับตำแหน่ง (Interleaved) และถูกส่งไปที่เสาอากาศ โดยสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วแทนด้วย x'_i โดย i คือจำนวนของชั้น และ t เป็นช่วงเวลา และเมตริกซ์ฝั่งส่งหลังจากมอดูเลตแล้วจะแทนด้วย \mathbf{X}

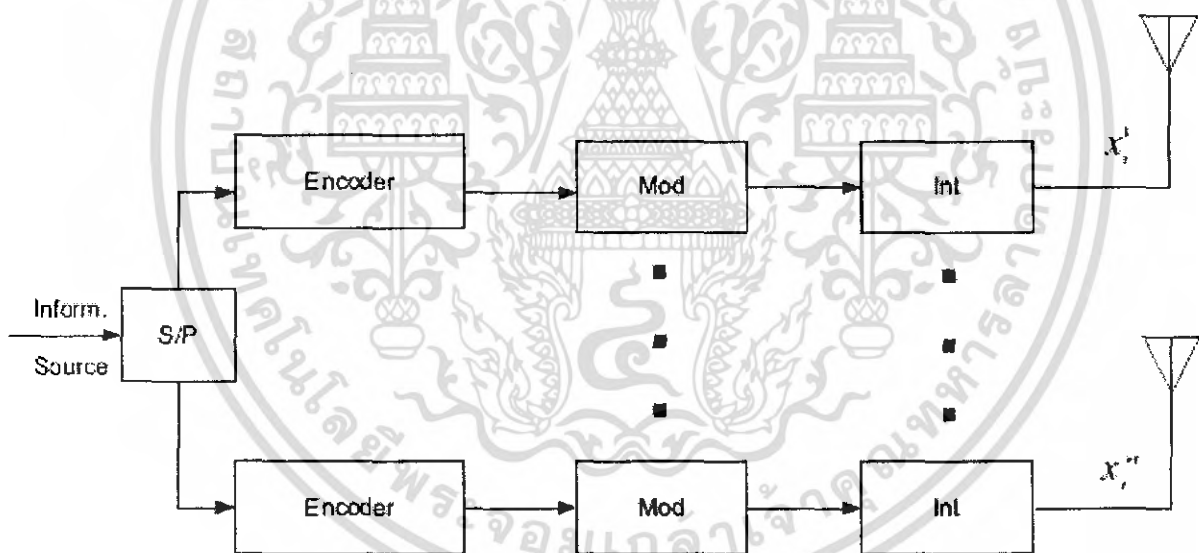
$$\mathbf{X} = [x'_i] \quad (2.40)$$

ตัวอย่างเช่น ในระบบจะมีเสาอากาศส่ง 3 ตัว เมทริกซ์ฝั่งส่ง \mathbf{X} จะเป็น

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & \dots \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & \dots \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 & \dots \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

ลำดับ $x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, \dots$ จะถูกส่งจากเสาอากาศคันที่ 1, ส่วนลำดับ $x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_4^2, \dots$ จะถูกส่งจากเสาอากาศคันที่ 2 และลำดับ $x_1^3, x_2^3, x_3^3, x_4^3, \dots$ จะถูกส่งจากเสาอากาศคันที่ 3

สถาปัตยกรรม HLST จะแยกข้อมูลที่เรียงกันออกเป็น n_T sub-streams และโดยแต่ละตัวจะถูกเข้ารหัส มอดูเลท ละสลับตำแหน่งแยกกันและจะถูกส่งไปเสาอากาศเฉพาะตัวมัน โดยสมมติว่าตัวเข้ารหัสแต่ละช่องสัญญาณจะใช้เหมือนกัน



รูปที่ 2.10 HLST architecture with a separate code in each layer

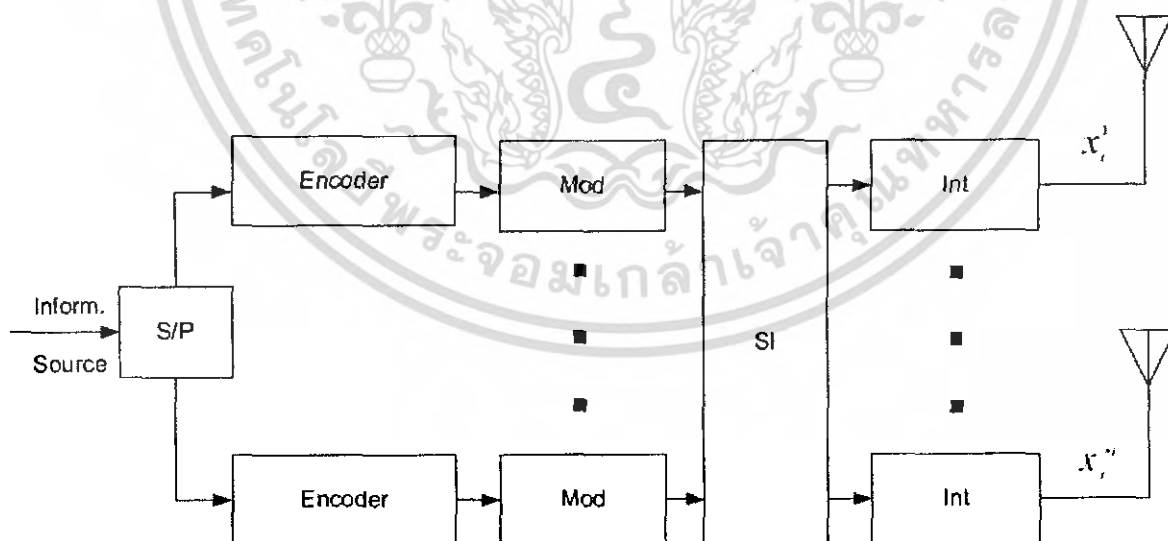
สถาปัตยกรรมแบบ diagonal layered space-time (DLST) จะให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งรหัสมอดูเลทของตัวเข้ารหัสแต่ละตัวจะถูกแยกออกไปที่เสาอากาศ n_T ตัวอย่างเช่น เมทริกซ์ฝั่งส่ง DSLT สำหรับเสาอากาศ 3 ตัว จะถูกทำให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ \mathbf{X} โดยมีค่าหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาเป็นแถว i th โดยจะเป็น $(i-1)$ time unit จากนั้น first nonzero จะอยู่ในแนวทแยงของ \mathbf{X} แนวทแยงจะแทนด้วย zeros จากนั้นแนวทแยงแรกจะมาจากเสาอากาศตัวแรก แนวทแยงที่ 2 จะมาจากเสาอากาศตัวที่ 2 แนวทแยงที่ 3 จะมาจากเสาอากาศตัวที่ 3 และแนวทแยงที่ 4 จะมาจากเสาอากาศตัวที่ 1 ไปเรื่อยๆ ดังนั้นรหัสของแต่ละตัวเข้ารหัสจะถูกส่งผ่านเสาอากาศที่ต่างกัน ทั้งหมดนี้จะเรียกว่า spatial interleaver : SI หลังจากมอดูเลทแล้ว spatial interleaving สำหรับ DLST จะเป็น

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & x_5^1 & x_6^1 & \dots \\ 0 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & x_5^2 & \dots \\ 0 & 0 & x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 & \dots \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & x_1^3 & x_4^1 & x_4^2 & x_4^3 & \dots \\ 0 & x_2^1 & x_2^2 & x_2^3 & x_5^1 & x_5^2 & \dots \\ 0 & 0 & x_3^1 & x_3^2 & x_3^3 & x_6^1 & \dots \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

แถวของเมทริกซ์ทางด้านขวามือจะมาจากการเรียงตามแนวของเมทริกซ์ทางด้านซ้ายมือ แถวแรกของเมทริกซ์จะมาจากเสาอากาศแรก แถวที่สองจะมาจากเสาอากาศตัวที่สอง และแถวที่สามจะมาจากเสาอากาศตัวที่สาม แนวของเลเยอร์จะเป็น space diversity ดังนั้นมันจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบแนวนอน (*horizontal*) แต่ก็เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพ (spectral efficiency loss) ขึ้น เนื่องจากเมทริกซ์ฝั่งรับทางด้านขวามือเป็นศูนย์



รูปที่ 2.11 DLST and TLST transmitter.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาปัตยกรรมแบบ Threaded layered spaced-time (TLST) จะมาจาก HLST ซึ่งจะใช้ spatial interleavers SI ก่อนจะทำการสลับตำแหน่ง ในระบบ $n_T = 3$ การดำเนินการของ SI จะอธิบายได้โดย

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & \dots \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & \dots \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 & \dots \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^3 & x_3^2 & x_4^1 & \dots \\ x_1^2 & x_2^1 & x_3^3 & x_4^2 & \dots \\ x_1^3 & x_2^2 & x_3^1 & x_4^3 & \dots \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

โดยส่วนประกอบของเมตริกซ์มอดูเลต (modulation matrix) ซึ่งแสดงทางด้านซ้ายมือ จะแทนด้วย x_i^t คือรหัสที่ถูกมอดูเลตแล้วของเลขอร์ i ณ เวลา t เมตริกซ์ทางด้านขวาแทนด้วย X' ซึ่งก็คือ เมตริกซ์ฝั่งส่ง TLST รหัสที่ถูกมอดูเลตแล้วจะเป็น X' ได้มาจากเลขอร์ที่ 1,3,2 และ 1 ซึ่งทุกๆตัวนั้นจะมาจากเสาอากาศตัวที่ 1

Spatial interleaver ของ TLST จะถูกแทนด้วยการสลับที่โดยการเลื่อนเป็นวงกลม (cyclic-shift interleaver) ถ้าเราให้เมตริกซ์ทางด้านซ้าย แทนด้วย X คอลัมน์แรกของเมตริกซ์ฝั่งส่ง X' จะเหมือนกับคอลัมน์แรกของเมตริกซ์ที่ถูกมอดูเลตแล้ว X คอลัมน์ที่สองของ X' จะได้จากการเลื่อน ของคอลัมน์ที่สองของ X โดยเลื่อนหนึ่งตำแหน่งจากบนลงล่าง คอลัมน์ที่สามของ X' จะได้จาก การเลื่อนของคอลัมน์ที่สามของ X โดยเลื่อนสองตำแหน่ง ขณะที่คอลัมน์ที่ 4 ของ X' จะเท่ากับคอลัมน์ที่ 4 ของ X

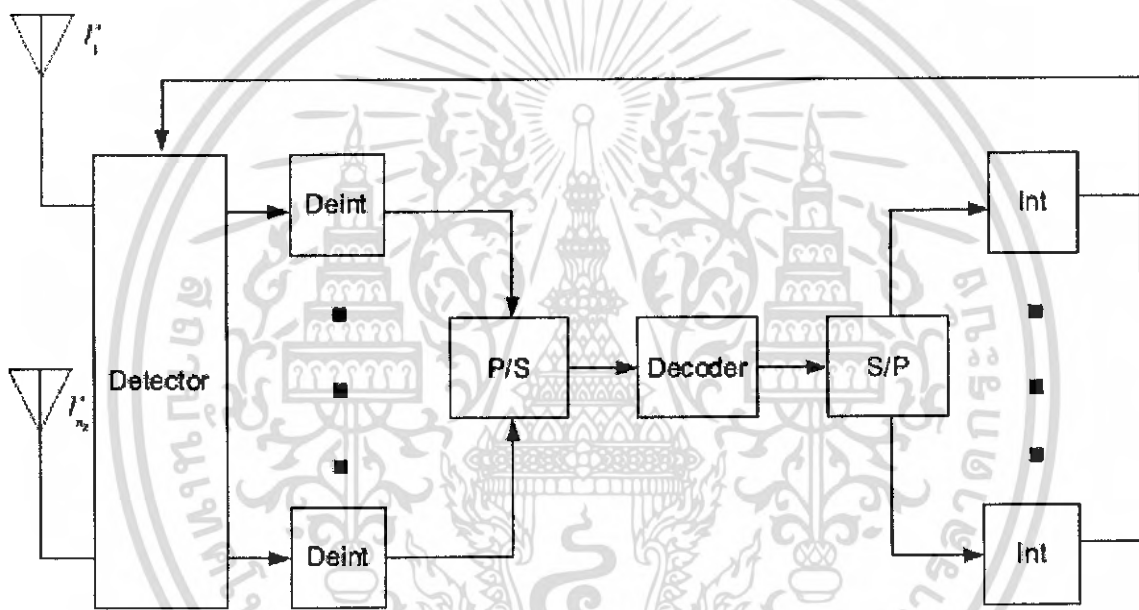
โดยทั่วไป ถ้าเราแทนค่าใน X' โดย x_i' จะสามารถเปลี่ยนค่าจาก x_i^t เป็น x_i' จะอธิบายได้โดย

$$x_i' = x_i^t, \quad i = [(i+t-2) \bmod n_T] + 1 \quad (2.44)$$

ประสิทธิภาพ (Spatral efficiency) ของ HLST และ TLST จะเป็น Rmn_T ซึ่ง R คือ code rate และ m คือจำนวนบิตในรหัสมอดูเลต ในขณะที่ประสิทธิภาพของ DLST จะลดลง เนื่องจากศูนย์ที่อยู่ในเมตริกซ์ฝั่งส่ง

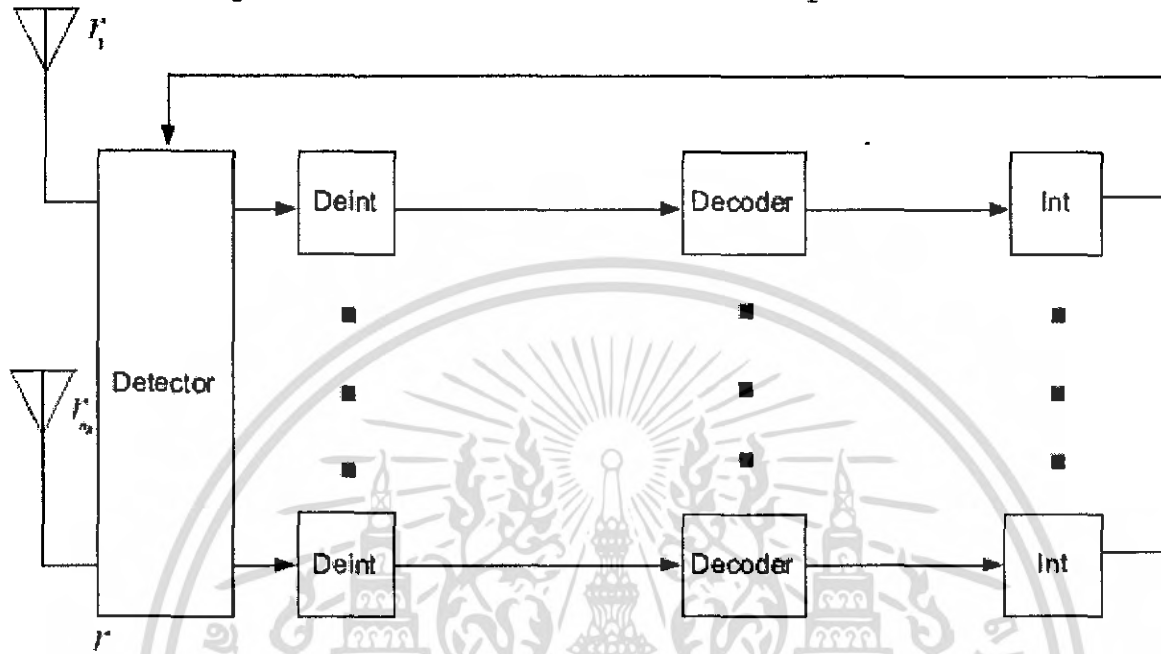
2.5.2 Iterative LST receiver

ความท้าทายในการออกแบบตัวตรวจจับสัญญาณ space-time คือการทำให้ตัวตรวจจับมีความซับซ้อนลดลง ซึ่งสามารถลดการรบกวนจากมัลติเลเยอร์ (multilayer) หลักการของกระบวนการวนซ้ำ (iterative processing) ที่อยู่ในรหัสเทอร์โบ (turbo coding) นั้นประสบความสำเร็จในการรวมการตรวจจับและการถอดรหัส ตัวรับสัญญาณแบบนี้จะใช้เฉพาะกับระบบ LST

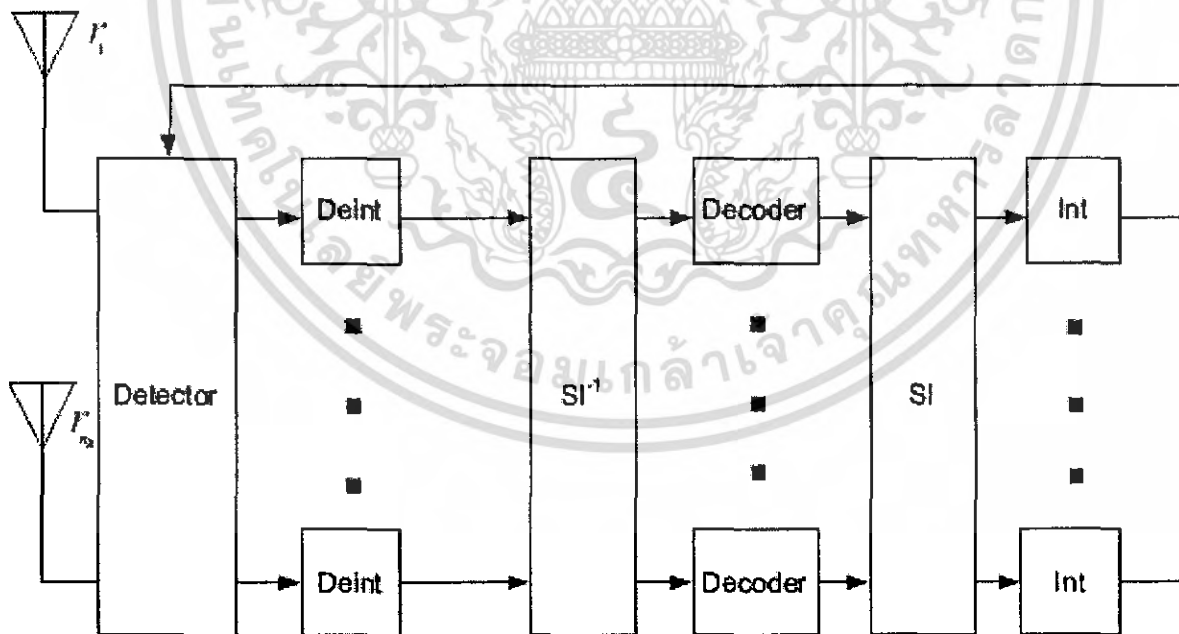


รูปที่ 2.12 Iterative HLST receiver with single decoder.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 Iterative HLST receiver with separate decoders.



รูปที่ 2.14 Iterative DLST and TLST receiver.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวรับทั้ง 3 ตัว ตัวตรวจจับจะใช้การคำนวณลำดับของรหัสที่ถูกส่งมา แบบ soft-decision ใน HLST แบบตัวถอดรหัสเดี่ยว (single decoder) สัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วจะถูกถอดรหัสรวมกันโดยตัวถอดรหัสเดี่ยวด้วย soft inputs/soft outputs ในขณะที่ HLST แบบตัวถอดรหัสแยก (separated decoder) นั้น สัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วแต่ละตัวจะถูกถอดรหัสโดยช่องถอดรหัสของแต่ละตัว ด้วย soft inputs/soft outputs ในการวนซ้ำแต่ละครั้ง ตัวถอดรหัสแบบ soft output นั้นถูกใช้เพื่ออัปเดตความน่าจะเป็น (Prior Probabilities) ของสัญญาณที่ถูกส่งมา ในการอัปเดตความเป็นไปได้มันใช้เพื่อคำนวณรหัสที่ตรวจจับได้

ใน DLST และ TLST ซึ่งประกอบด้วย time interleaving/deinterleaving นั้นมี space interleaving/deinterleaving คั่นอยู่

ตัวถอดรหัสจะใช้อัลกอริทึมของ soft output, Maximum a posteriori (MAP) จะดีที่สุดเพราะว่ามีบิตผิดพลาด (bit error) ที่ออกมาน้อย ตัว log-MAP decoding ซึ่งเป็นเวอร์ชันที่เพิ่มเติมมาจากอัลกอริทึม MAP นั้น ทำงานใน log-domain ดังนั้นจะทำให้มีความซับซ้อนน้อยลง Soft output Viterbi algorithm (SOVA) นั้นมีความซับซ้อนน้อยที่สุด และค่อนข้างจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ MAP decoder ความซับซ้อนของฝั่งรับทั้งหมดนั้น ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของ ตัวถอดรหัส การเลือกใช้อัลกอริทึมตัวถอดรหัสจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่มีอยู่ในฝั่งรับ

2.6 การสลับตำแหน่ง (Interleave)

การสลับตำแหน่งนั้นเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงข้อมูลดิจิทัล ให้มีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากเดิม ซึ่งถูกนำมาใช้ในระบบสื่อสารเพื่อป้องกันการผิดพลาดของข้อมูลในรูปแบบของ Burst Error แต่สำหรับกรณีของวงจรเข้ารหัสแบบ Turbo Codes นั้น จะมีการนำการสลับตำแหน่งมาใช้งานโดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ข้อมูลที่ไต่จากการเข้ารหัสจากวงจรเข้ารหัสต่าง ๆ นั้น มีลักษณะของข้อมูลที่ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยจะเป็นการนำข้อมูลดิบที่จะทำการเข้ารหัสในวงจรเข้ารหัสต่างๆ มาผ่านการสลับตำแหน่งเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูล (permutation) เพื่อให้ข้อมูลที่เข้ารหัสนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน

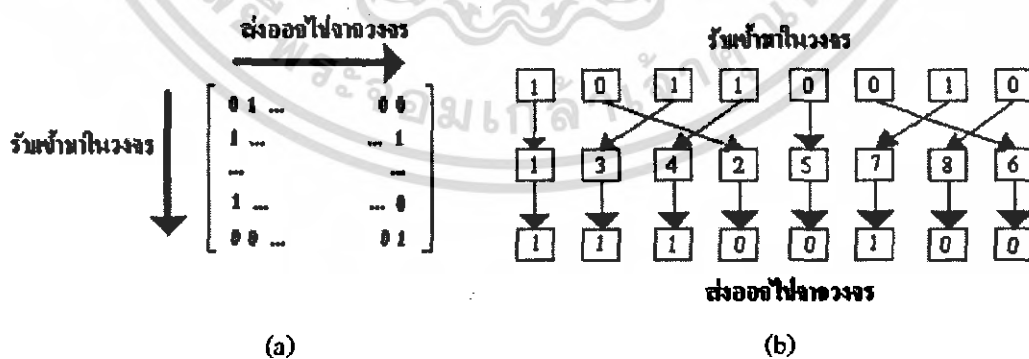
สำหรับวิธีการที่ใช้ในการสลับตำแหน่งนั้น จะมีรูปแบบในการทำงานอยู่หลายวิธีการด้วยกัน และในการทำงานแต่ละวิธีการนั้น จะให้ผลลัพธ์ในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยสำหรับตัวอย่างของรูปแบบในการสลับตำแหน่ง ได้แก่ วิธีการสลับตำแหน่งแบบ Block Interleave และ Random Interleave

2.6.1 Block Interleave

สำหรับการสลับตำแหน่งด้วยวิธีการสลับข้อมูลแบบ Block Interleave นั้น จะเป็นวิธีการที่มีการนิยมใช้งานสำหรับระบบสื่อสาร โดยในการทำงานเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลนั้นจะมีลักษณะการทำงานที่สามารถแสดงการทำงานโดยใช้เมตริกดังรูปที่ 8(a) โดยในการทำงานนั้น จะเป็นการดึงข้อมูลที่จะทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเข้ามาเก็บไว้ในเมมโมรีโดยจะมีการเก็บข้อมูลเรียงจากบนลงล่างและ ช้ายไปขวา โดยจะมีการเก็บข้อมูลในลักษณะนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมมโมรีในวงจรมีการเก็บข้อมูลไว้ทุกตำแหน่งแล้ว จากนั้นจึงส่งข้อมูลออกจากวงจรโดยการเรียงลำดับการส่งจากซ้ายไปขวา และ บนลงล่าง และจะมีการส่งข้อมูลในลักษณะนี้เรื่อยๆ จนกระทั่งข้อมูลทุกตำแหน่งในเมมโมรีถูกส่งออกจากวงจรแล้ว จากนั้นจึงมีการรับข้อมูลชุดต่อไปเข้ามาในวงจรเพื่อทำงานในครั้งต่อไป โดยจะมีการทำงานในลักษณะนี้จนกระทั่งข้อมูลทั้งหมดได้ผ่านกระบวนการสลับตำแหน่งแล้ว จึงสิ้นสุดการทำงาน

2.6.2 Random (Pseudo-Random) Interleave

ในการสลับตำแหน่งด้วยวิธีการแบบ Random Interleave นั้น จะมีการใช้การสุ่มตัวเลขขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับกำหนดรูปแบบในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล โดยในการทำงานนั้น จะมีการนำข้อมูลมาครั้งละ 1 ชุด เพื่อทำการสลับตำแหน่งของข้อมูลให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ตามรูปแบบของค่าที่ได้จากการสุ่ม โดยจะมีลักษณะในการทำงานดังตัวอย่างในรูปที่ 8(b) ที่เป็นตัวอย่างของการสลับตำแหน่งแบบ Random Interleave ที่มีการดึงข้อมูลเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 8 บิตเพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล



รูปที่ 2.15 การสลับตำแหน่ง (a)Block Interleave , (b) Random Interleave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 อัลกอริทึมถอดรหัส MAP (MAP Decoding Algorithm)

อัลกอริทึม maximum a posteriori probability (MAP) เป็นวิธีการถอดรหัสโดยการหาความน่าจะเป็นที่น้อยที่สุดที่เกิดผิดพลาด ในขณะที่ อัลกอริทึม Viterbi จะใช้ความน่าจะเป็นที่น้อยที่สุดใน การเกิดลำดับผิดพลาด อัลกอริทึมแบบ MAP นั้นจะมีการคำนวณที่ซับซ้อนกว่าอัลกอริทึมแบบ Viterbi และต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับคลื่นรบกวน อย่างไรก็ตาม MAP นั้นจะพิจารณาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ในเทลีสแต้อัลกอริทึมแบบ soft output Viterbi (SOVA) นั้นจะพิจารณาเฉพาะเส้นทาง ML และ SC ทำให้ อัลกอริทึมแบบ MAP ใช้งานได้ดีกว่าในด้านการถอดรหัสแบบวนซ้ำ

ตัวถอดรหัส soft-output MAP จะคำนวณอัตราส่วน a posteriori log-likelihood สำหรับบิต ข้อมูล u_i ได้ดังนี้

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{P\{u_i = 1 | r\}}{P\{u_i = 0 | r\}} \quad (2.45)$$

โดย $P\{u_i = i | r\}, i = 0,1$ เป็นสภาพความน่าจะเป็น (APP) ของบิตข้อมูล u_i ตัวถอดรหัสจะทำการ ตัดสินใจแบบหยาบ (Hard-Decision) โดยเปรียบเทียบ $\Lambda(u_i)$ เป็นศูนย์

$$\Lambda(u_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Lambda(u_i) > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.46)$$

APP ในสมการที่ 2.45 สามารถคำนวณได้จาก โคอะแกรมเทลีสดังนี้

$$P(u_i = 0 | r) = \sum_{(m',m) \in B_i^0} P\{S_{t-1} = m', S_t = m | r\} \quad (2.47)$$

$$P(u_i = 1 | r) = \sum_{(m',m) \in B_i^1} P\{S_{t-1} = m', S_t = m | r\} \quad (2.48)$$

โดย S_{t-1} และ S_t เป็นการเข้ารหัสที่เวลา $t-1$ และ t , และ B_i^0 และ B_i^1 เป็นเซตของการ เปลี่ยนแปลงจาก m' ไป m ที่เกิดจาก $u_i = 0$ และ $u_i = 1$ สมการที่ และ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P(u_i = 0 | r) = \sum_{(m', m) \in B_i^0} \frac{P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r\}}{P\{r\}} \quad (2.49)$$

$$P(u_i = 1 | r) = \sum_{(m', m) \in B_i^1} \frac{P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r_1^N\}}{P\{r\}} \quad (2.50)$$

โดย $P\{r\}$ เป็นค่าคงที่ แต่ค่ามันน้อยมากทำให้สามารถตัดทิ้งได้

ประสิทธิภาพในการคำนวณบิตข้อมูล APPs ฟังก์ชันความน่าจะเป็นอธิบายได้ดังนี้

$$\alpha_i(m) = P\{S_i = m, r_i^i\} \quad (2.51)$$

$$\beta_i(m) = P\{r_{i+1}^N | S_i = m\} \quad (2.52)$$

$$\gamma_i'(m', m) = P\{u_i = i, S_i = m, r_i | S_{i-1} = m'\} \quad (2.53)$$

โดย

$$r_i = (r_{i,0}, \dots, r_{i,j}, \dots, r_{i,n-1}) \quad (2.54)$$

$$r_i^k = (r_i, r_{i+1}, \dots, r_k) \quad (2.55)$$

ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงร่วมกัน $P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r\}$ สามารถอธิบายดังนี้

$$P\{S_{i-1} = m', S_i = m, r\} = \alpha_{i-1}(m') \sum_{i \in \{0,1\}} \gamma_i'(m', m) \beta_i(m) \quad (2.56)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_i(m) = \sum_{m'} \alpha_{i-1}(m') \sum_{j \in \{0,1\}} \gamma_j'(m', m) \quad (2.57)$$

$$\beta_i(m) = \sum_{m'} \beta_{i+1}(m') \sum_{j \in \{0,1\}} \gamma_j'(m', m) \quad (2.58)$$

และ $\gamma_j'(m', m)$ คือความน่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคำนวณจากความน่าจะเป็นของ p ของบิตข้อมูลที่ผ่านมา $p_i(u_i = i), i = 0, 1$ โดย u_i เป็นสัญลักษณ์ข้อมูลที่มาจากการเปลี่ยนแปลง $S_{i-1} = m' \rightarrow S_i = m$ ค่าสัมประสิทธิ์ $\gamma_j'(m', m)$ เขียนได้ดังนี้

$$\gamma_j'(m', m) = p_i(u_i = i) \prod_{j=0}^{j=n-1} P\{r_{i,j} | x_{i,j}\} \quad (2.59)$$

$$P\{r_{i,j} | x_{i,j}\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(r_{i,j} - x_{i,j})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.60)$$

โดย $x_{i,j}, j = 0, \dots, n-1$ เป็นสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตแบบ BPSK ใน codeword ที่มาจากการเปลี่ยนแปลง $S_{i-1} = m' \rightarrow S_i = m$

ถ้าเราสมมติว่าตัวเข้ารหัสเริ่มและจบที่ศูนย์เงื่อนไขที่ได้คือ

$$\alpha_0(0) = 1, \quad \alpha_0(m) = 0, \quad \text{for } m \neq 0 \quad (2.61)$$

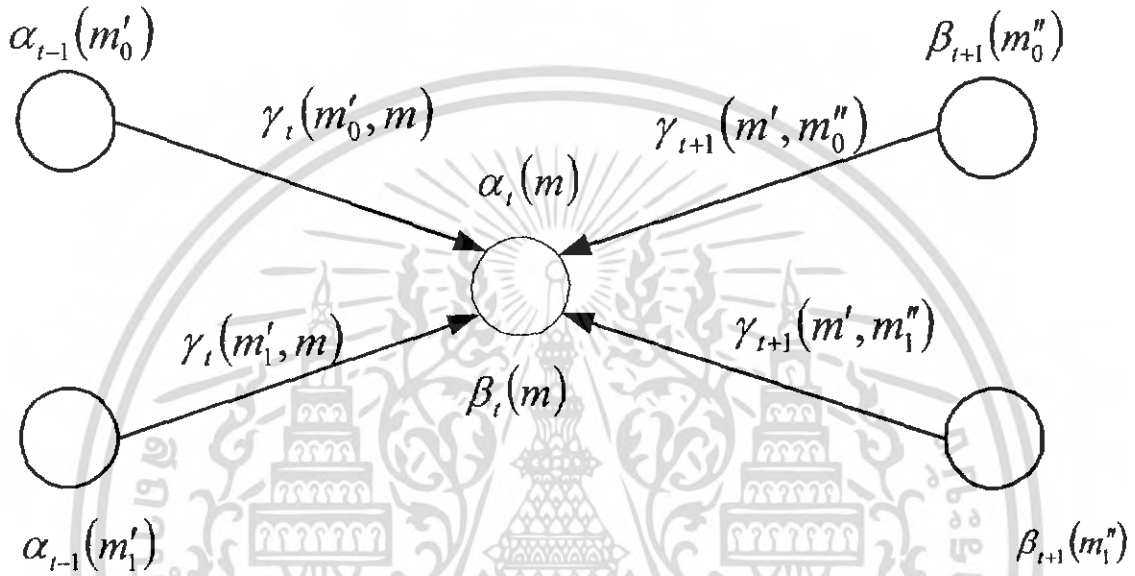
$$\beta_N(0) = 1, \quad \beta_N(m) = 0, \quad \text{for } m \neq 0 \quad (2.62)$$

อัตราส่วน Log-likelihood จะเป็นดังนี้

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{\sum_{(m', m) \in B^1} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i'(m', m) \beta_i(m)}{\sum_{(m', m) \in B^0} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i^0(m', m) \beta_i(m)} \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมด้านบนจะถูกอ้างถึงบ่อยๆ ในอัลกอริทึมเดินหน้าและย้อนกลับ ค่าสัมประสิทธิ์ $\alpha_i(m)$ จะถูกคำนวณจากจุดเริ่มต้นในเทลิส “กระบวนการเดินหน้า” และค่าสัมประสิทธิ์ $\beta_i(m)$ จะถูกคำนวณจากจุดสิ้นสุดในเทลิส “กระบวนการย้อนกลับ”



รูปที่ 2.16 แสดงการทำงานของกระบวนการเดินหน้าและย้อนกลับ

ในรูป $\alpha_{i-1}(m'_i)$ แทนค่าสัมประสิทธิ์ α สำหรับ m'_i ใน $(i-1)$ -th ที่ติดต่อกับ m ใน i -th ที่มีการเปลี่ยนแปลง $S_{i-1} = m' \rightarrow S_i = m$ ที่มีบิตข้อมูลเป็น $u_i = i, i = 0,1$ เช่นเดียวกับ $\beta_{i+1}(m'')$ แทนค่าสัมประสิทธิ์ β สำหรับ m'' ใน $(i+1)$ -th ที่ติดต่อกับ m ใน i -th ที่มีการเปลี่ยนแปลง $S_{i-1} = m' \rightarrow S_i = m_i$ ที่มีบิตข้อมูลเป็น $u_i = i, i = 0,1$ สภาพความน่าจะเป็นของบิตข้อมูลสามารถคำนวณได้โดย

$$P\{u_i = 0|r\} = \frac{1}{1 + e^{\Lambda(u_i)}} \tag{2.64}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P\{u_r = i | \mathbf{r}\} = \frac{e^{\Lambda(u_r)}}{1 + e^{\Lambda(u_r)}} \quad (2.65)$$

สภาพความน่าจะเป็นของบิตที่ถูกส่งมาสามารถคำนวณโดยเพิ่มความน่าจะเป็นของ codeword ที่ประกอบด้วยบิตพิเศษดังนี้

$$P\{x_{r,j} = 1 | \mathbf{r}\} = \sum_{u_r = i, x_{r,j} = 1} P\{u_r = i | \mathbf{r}\} \quad (2.66)$$

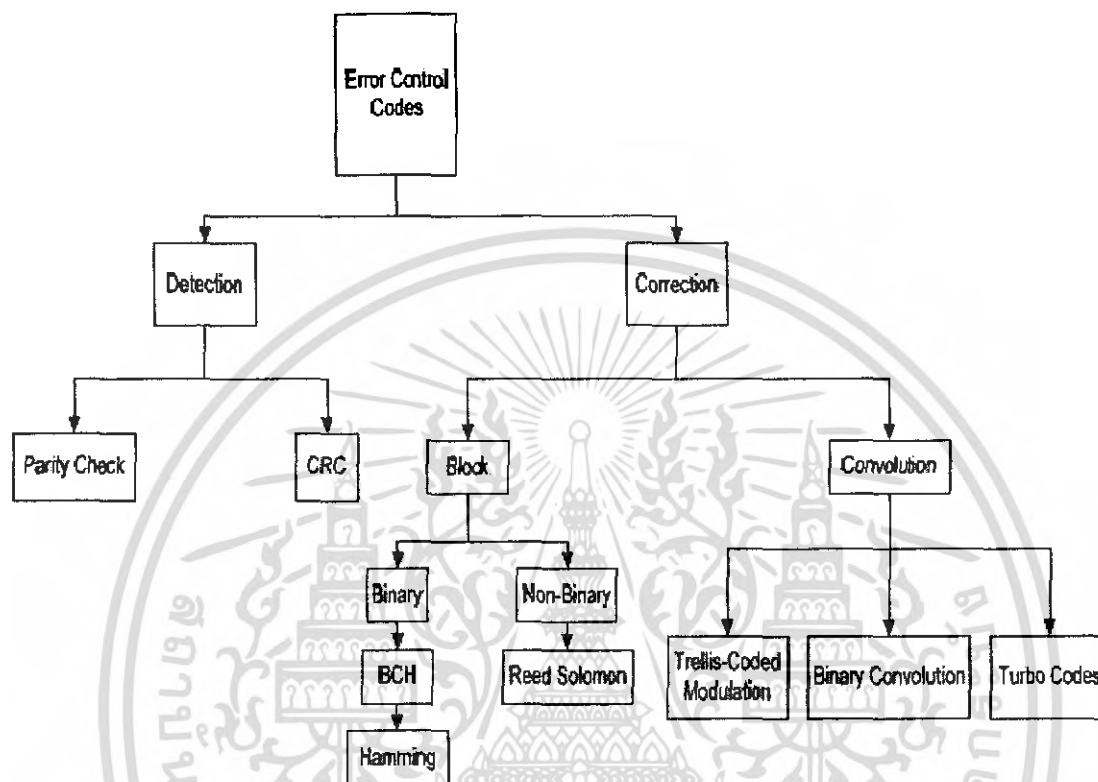
$$P\{x_{r,j} = -1 | \mathbf{r}\} = \sum_{u_r = i, x_{r,j} = -1} P\{u_r = i | \mathbf{r}\} \quad (2.67)$$

2.8 หลักการพื้นฐานของรหัสแก้ไขความผิดพลาด

รหัสควบคุมความผิดพลาด (Error Control Codes) เป็นเทคนิคของกระบวนการทางดิจิทัล (Digital Processing Technique) เพื่อที่จะตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของสัญญาณในการส่งข้อมูล สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆคือ รหัสเพื่อตรวจสอบความผิดพลาด (Error Detection Code) และรหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด (Error Correction Code) โดยสามารถแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆได้อีกดังรูปที่ 2.17

การเข้ารหัสแก้ไขความผิดพลาดในระบบสื่อสารเป็นวิธีการที่ใช้ในการลดความผิดพลาดในการรับ-ส่งข้อมูลเพื่อให้มีการผิดพลาดน้อยลงเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารที่ไม่มีการเข้ารหัส โดยวิธีการที่ใช้ในการเข้ารหัสนั้นจะเป็นการนำข้อมูลดิจิทัลที่ส่งผ่านระบบสื่อสารมาเปลี่ยนแปลงรูปแบบข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า “คำรหัส” (Code Word) โดยคำรหัสนี้จะมีความสามารถในการแก้ไขหรือตรวจจับข้อมูลที่ผิดพลาดในระหว่างการรับ-ส่งให้กลับมาเป็นข้อมูลที่ถูกต้องได้โดยในระบบสื่อสารจะมีภาคเข้ารหัส (Encoder) ใช้สำหรับแปลงข้อมูลที่จะทำการส่งให้อยู่ในรูปแบบของคำรหัส และภาคถอดรหัส (Decoder) ใช้สำหรับการนำข้อมูลที่ได้รับปลายทางมาทำการประมวลผลเพื่อหาข้อมูลต้นทางที่ส่งมา ซึ่งลักษณะของข้อมูลที่ได้หลังจากกระบวนการเข้ารหัสข้อมูลนั้นจะมีขนาดของข้อมูลมากกว่าข้อมูลที่ไม่ได้ทำการเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



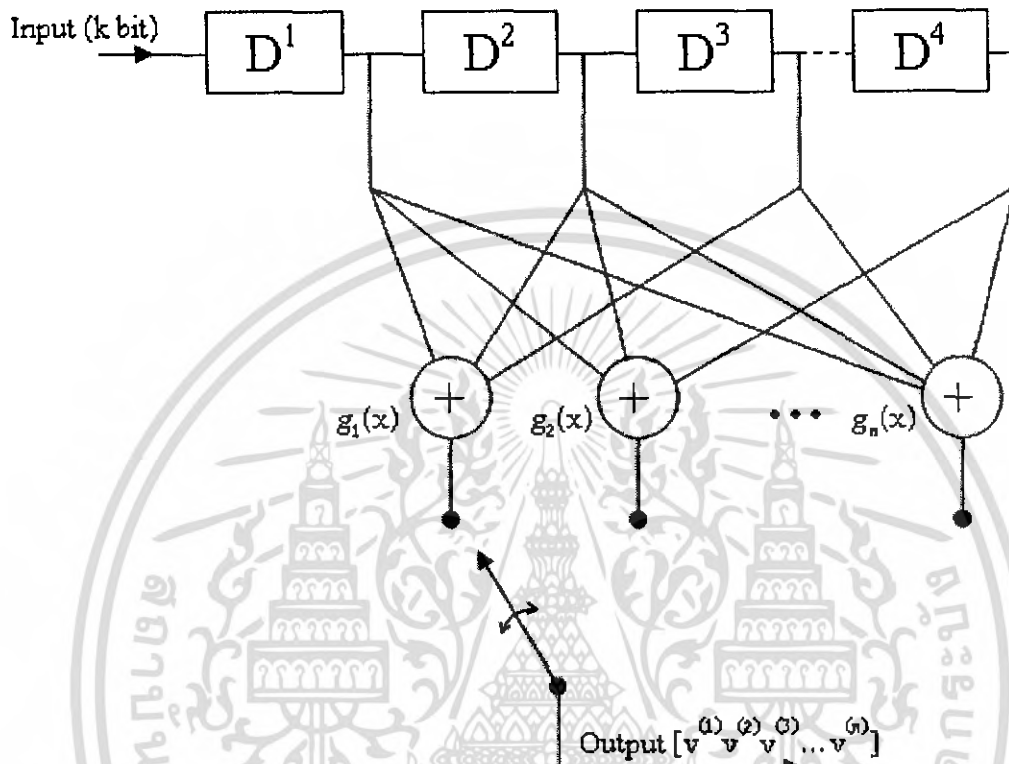
รูปที่ 2.17 ประเภทของรหัสควบคุมความผิดพลาด

2.9 รหัสคอนโวลูชัน (Convolution Code)

2.9.1 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน

ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน ที่ทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดมาก ๆ นิยมใช้การเข้ารหัสสำหรับแก้ไขการผิดพลาดล่วงหน้า คือ การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolution Code) ซึ่งเป็นกระบวนการเข้ารหัสที่ไม่จำเป็นต้องมีการแบ่งบิตข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสออกเป็นบล็อก ๆ คือ การเข้ารหัสสามารถป้อนชุดบิตข้อมูลขนาดความยาวเท่าใดก็ได้เข้าสู่วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน และผลลัพธ์ที่ได้จากการเข้ารหัสจะเป็นชุดคำรหัสที่มีความยาวเป็นจำนวนเท่าของชุดบิตข้อมูลที่ป้อนเข้าการเข้ารหัสคอนโวลูชัน เป็นการหาความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลอินพุตที่เรียงลำดับอย่างต่อเนื่อง โดยวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ซึ่งประกอบด้วย ตัวรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่หน่วงเวลา (Shift Register) และ เอ็กคูซิฟอ (Exclusive OR)

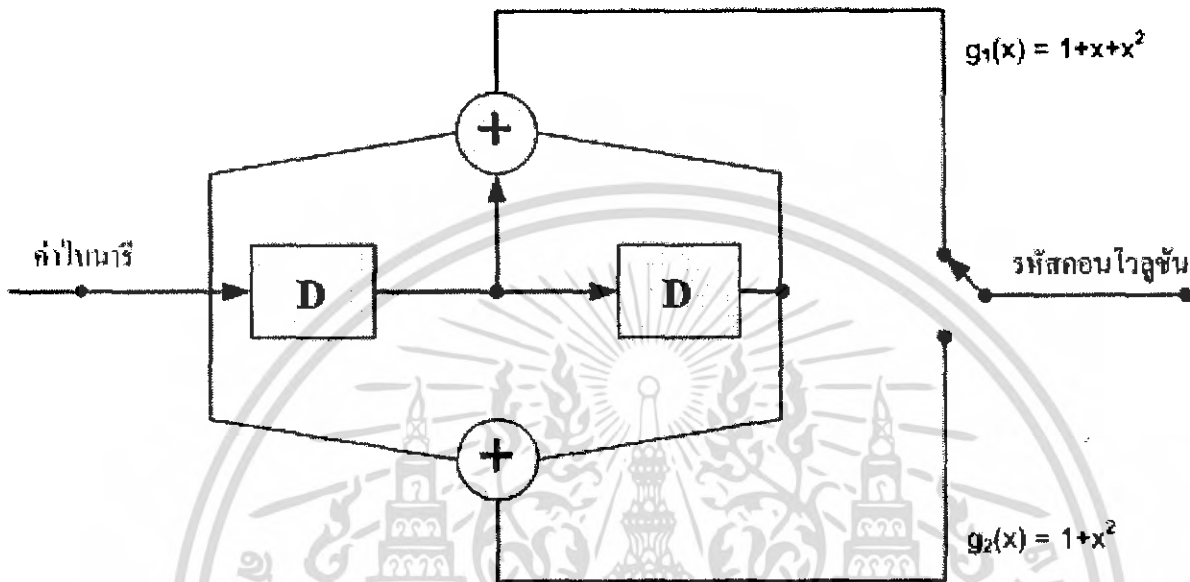
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 โครงสร้างวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน

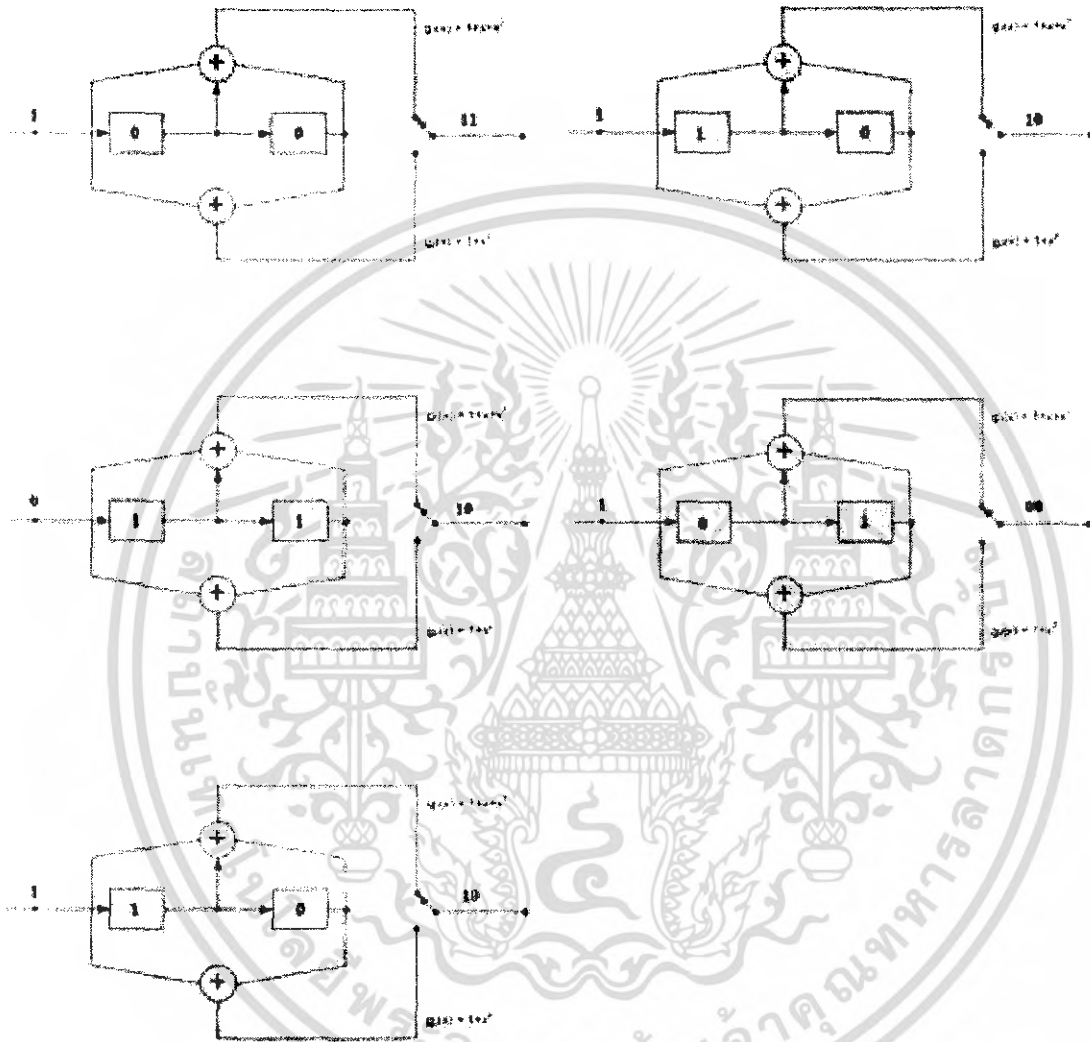
การทำงานของเข้ารหัสคอนโวลูชันแสดงในรูปที่ 2.18 โดยการเข้ารหัสแต่ละครั้งจะต้องป้อนข้อมูลอินพุตจำนวน k บิต เข้าวงจรเข้ารหัสแบบต่อเนื่อง โดยข้อมูลเอาต์พุตของการเข้ารหัส จะเกิดจากการนำข้อมูลอินพุตและข้อมูลในรีจิสเตอร์ มาเอ็กซอร์ฟอกกัน โดยมี Generator Polynomial ($g(x)$) แสดงตำแหน่งที่จะนำมาเอ็กซอร์ฟอกกัน ซึ่งเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างบิตข้อมูลที่ต่อเนื่องกัน โดยความกว้างของข้อมูลที่ต่อเนื่องกันนี้เรียกว่า Constraint Length (K) การอ่านค่าเอาต์พุตของการเข้ารหัสจะอ่านค่า $v^{(1)}, v^{(2)}, v^{(3)} \dots v^{(n)}$ ทีละบิตไปจนกระทั่งครบทั้ง n บิต โดยข้อมูลที่ได้ออกจากการเข้ารหัสจะมีความยาวเป็น n เท่าของข้อมูลก่อนทำการเข้ารหัส ส่วนค่าอัตราเข้ารหัส (R) เป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลอินพุต (k) ต่อจำนวนเอาต์พุต (n) หรือ k/n

2.9.2 ตัวอย่างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน



รูปที่ 2.19 วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่ค่า R เท่ากับ $1/2$ และค่า K เท่ากับ 3

ในการทำความเข้าใจกับกลไกการทำงานของวิธีการเข้ารหัสคอนโวลูชัน เราจะอาศัย วงจรเข้ารหัสที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ Constraint Length เท่ากับ 3 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ $1+x+x^2$ และ g_2 คือ $1+x^2$ ในรูปที่ 3.3 เป็นตัวอย่างในการอธิบาย จากวงจร ในรูปจะเห็นว่า $k=1$ ดังนั้นจำนวนบิตที่เลื่อนเข้าในการเข้ารหัสแต่ละครั้งจะมีเพียง 1 บิต ค่า Constraint Length(K) = 3 หมายความว่าต้องใช้รีจิสเตอร์จำนวน 2 ชุด การเข้ารหัสข้อมูลแต่ละบิตจะให้เป็นการรหัสจำนวน 2 บิต โดยค่าการรหัสจะได้จากขาออก ของวงจรพหุนามของ $g_1(x)$ และ $g_2(x)$ โดยกระบวนการอ่านค่าเหล่านี้จะวนสลับกันไป ยกตัวอย่างเช่น ถ้าบิตข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสมีค่าเป็น 11011 การรหัสที่ได้จากวงจรเข้ารหัสจะมีค่าเท่ากับ $11\ 10\ 10\ 00\ 10$



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสข้อมูล 11011 โดยใช้วงจรเข้ารหัสรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 แผนภาพไคอะแกรมสถานะ (State Diagram)

ในการพิจารณาและการเข้าถึงคุณลักษณะของวงจรเข้ารหัสเราสามารถใช่แผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะ (State Diagram) ช่วยในการอธิบาย จากวงจรในรูปที่ 2.19 วงจรใช้รีจิสเตอร์จำนวน 2 ตัว สถานะของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในรีจิสเตอร์มีได้ $2^2 = 4$ สถานะ คือ $a = 00$, $b = 10$, $c = 01$, $d = 11$

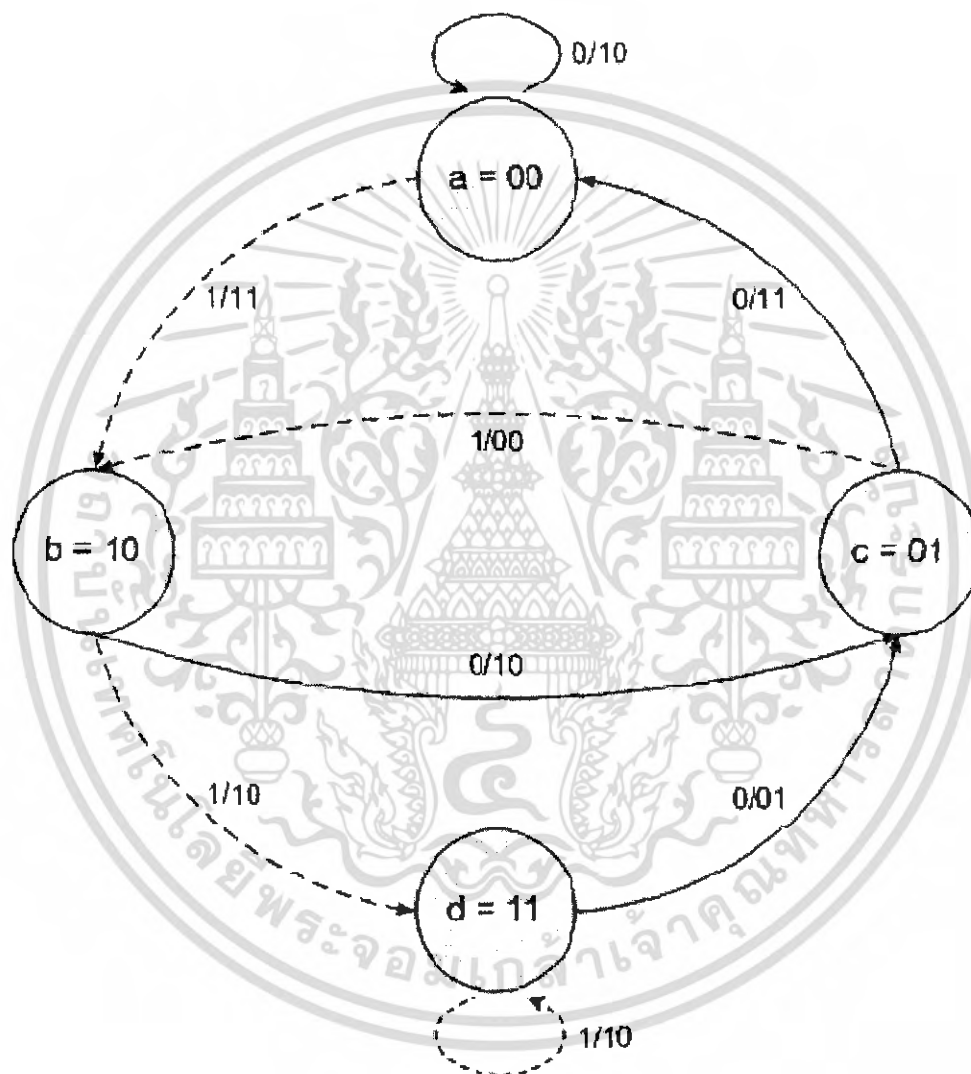
สถานะ	อินพุต	เอาต์พุต	สถานะต่อไป
$a = 00$	0	0 0	a
	1	1 1	b
$b = 10$	0	1 0	c
	1	0 1	d
$c = 01$	0	1 1	a
	1	0 0	b
$d = 11$	0	0 1	c
	1	1 0	d

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสถานะจากการเข้ารหัสโดยใช้วงจร ในรูปที่ 2.19

จากตารางสามารถเขียนไคอะแกรมของสถานะแทนได้ดังรูปที่ 2.20 ค่าในวงกลมแสดงสถานะของข้อมูลที่อยู่ในรีจิสเตอร์แต่ละตัว และเส้นที่เชื่อมระหว่างวงกลมแสดงการเปลี่ยนสถานะซึ่งขึ้นอยู่กัอินพุตที่เป็น 0 หรือ 1

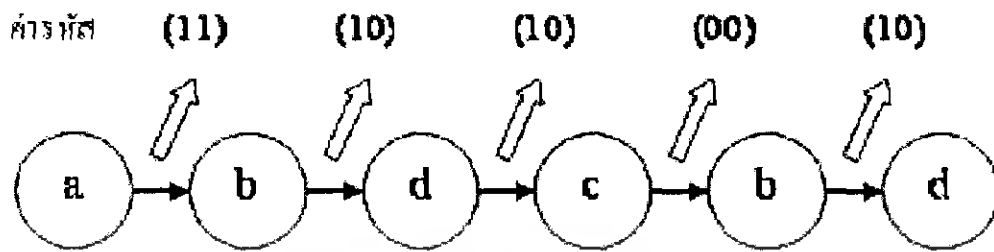
ยกตัวอย่าง เช่น การเข้ารหัสที่มีข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสมีค่าเป็น 11011 วงจรเข้ารหัสอยู่ในสถานะ a เมื่อได้รับการป้อนข้อมูลบิตแรกที่มีค่าเท่ากับ 1 เข้าสู่วงจรส่งผลให้วงจรเปลี่ยนสถานะจาก a ไปเป็น b เมื่อป้อนข้อมูลบิตที่สองที่มีค่าเป็น 1 เข้าไปในวงจร ผลที่เกิดขึ้นคือวงจรเปลี่ยนจากสถานะ b ไปเป็น c บิตที่สามที่ป้อนเข้าสู่วงจรมีค่าเป็น 0 ระบบจึงเปลี่ยนสถานะจาก d ไปสู่สถานะ c บิตที่สี่ที่ป้อนเข้าสู่วงจรมีค่าเป็น 1 ระบบจึงเปลี่ยนสถานะจาก c ไปสู่สถานะ

b และบิตสุดท้ายคือบิตที่ห้าที่มีค่าเป็น 1 เข้าไปในวงจร ผลที่เกิดขึ้นคือวงจรเปลี่ยนจากสถานะ b ไปเป็น d หากนำลำดับตามเวลาจะแสดงผลแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 แสดงไดอะแกรมสถานะของวงจรรูปที่ 2.20

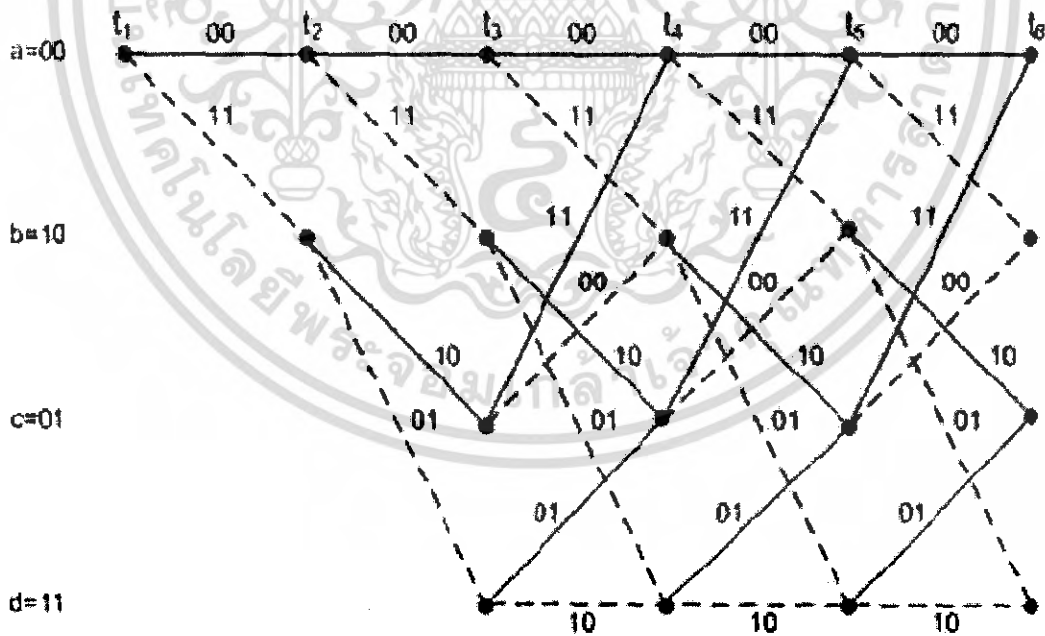
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นและคำรหัสที่ได้

2.9.4 ไตอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram)

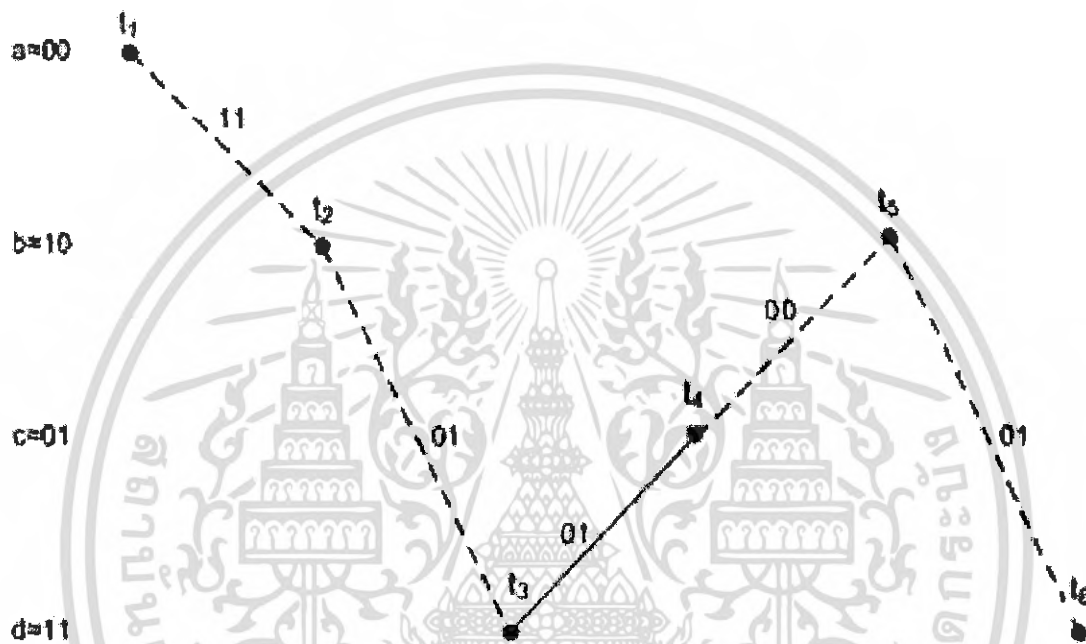
จากแผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะ ถ้าเราเพิ่มแกนทางเวลาในลักษณะที่คล้ายคลึงกับ รูปที่ 2.21 เพียงแต่มีการแสดงสถานะของระบบทั้งหมดในแต่ละเวลาอย่างเป็นระบบผลที่ได้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.22 แผนภาพที่กล่าวถึงนี้มีชื่อเรียกว่า ไตอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram) ตั้งแต่จุดเริ่มต้นของภาพจะอยู่ที่สถานะ a เสมอจากนั้นบิตข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสจะทำให้วงจรเปลี่ยนสถานะไป จากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างของไตอะแกรมทรีริส จะเริ่มจ่าจากบิตที่ 3



รูปที่ 2.23 แสดงไตอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวอย่างการเข้ารหัสข้อมูล 11011 ที่อธิบายไว้ในข้างต้นเราสามารถแสดงรายละเอียดของไดอะแกรมทริริส ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.23 สังเกตว่าวงจรเข้ารหัสจะเริ่มต้นจากสถานะ a เสมอ



รูปที่ 2.24 แสดงไดอะแกรมทริริสของการเข้ารหัสคอนโวลูชันในตัวอย่าง 2.9.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

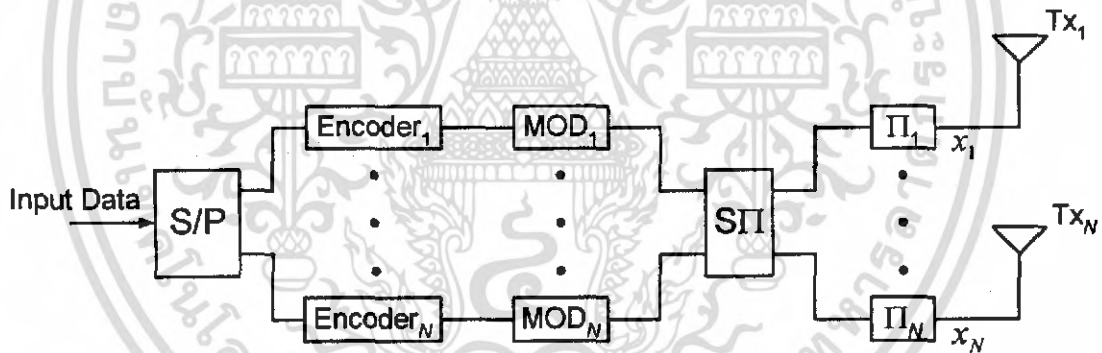
การออกแบบโครงงาน

ในบทนี้จะใช้การจำลอง โครงสร้างของระบบการสื่อสารหลายทางเข้าหลายทางออกโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บเพื่อทำการหาค่าผิดพลาดเฉลี่ย (BER) ต่ออัตราส่วนของพลังงานเฉลี่ยต่อบิต (E_b) กับ ความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนขาว (N_0) ในเชิงของเวลาและความถี่

3.1 โครงสร้างของระบบฝั่งส่ง

โครงสร้างของระบบฝั่งส่ง TLSTC ประกอบด้วยเสาอากาศส่งจำนวน N และเสาอากาศรับจำนวน M ข้อมูลไบนารีจะถูกแปลงโดยใช้ตัวแปลงอนุกรมเป็นขนาน (serial to parallel converter) และข้อมูลจะถูกเข้ารหัสคอนไวจันซ์สำหรับแต่ละเลเยอร์เพื่อส่งผ่านเสาอากาศในฝั่งส่ง N

ข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วในแต่ละเลเยอร์จะถูกมอดูเลตและถูกสลับตำแหน่ง (spatial interleaver) เพื่อสร้างชุดรหัสสำหรับทุกๆเลเยอร์ของเสาอากาศส่งแต่ละตัว หลังจากผ่านขั้นตอนการสลับตำแหน่งในเชิงของเวลาแล้ว สัญญาณที่ถูกเข้ารหัสของแต่ละเลเยอร์จะถูกส่งไปพร้อมๆกันในเวลาเดียวกันจากเสาอากาศส่ง N ผ่านช่องสัญญาณ MIMO



รูปที่ 3.1 โครงสร้าง Layered space-time transmitter

สัญญาณที่ได้รับเข้ามาในเสาอากาศรับ M แต่ละตัวจะมีสัญญาณรบกวนขาวปนมาด้วย (additive white Gaussian noise : AGWN)

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3.1)$$

โดย \mathbf{r} คือ $\mathbf{r} = [r_1, \dots, r_M]^T$ คือสัญญาณที่ได้รับเป็นเวกเตอร์ $M \times 1$ คอลัมน์, \mathbf{H} คือเมตริกซ์ช่องสัญญาณ $M \times N$, \mathbf{x} คือสัญญาณที่ถูกส่งผ่านเสาอากาศฝั่งส่งเป็นเวกเตอร์ $N \times 1$ และ \mathbf{n} คือเวกเตอร์ $M \times 1$ ของสัญญาณรบกวนขาว

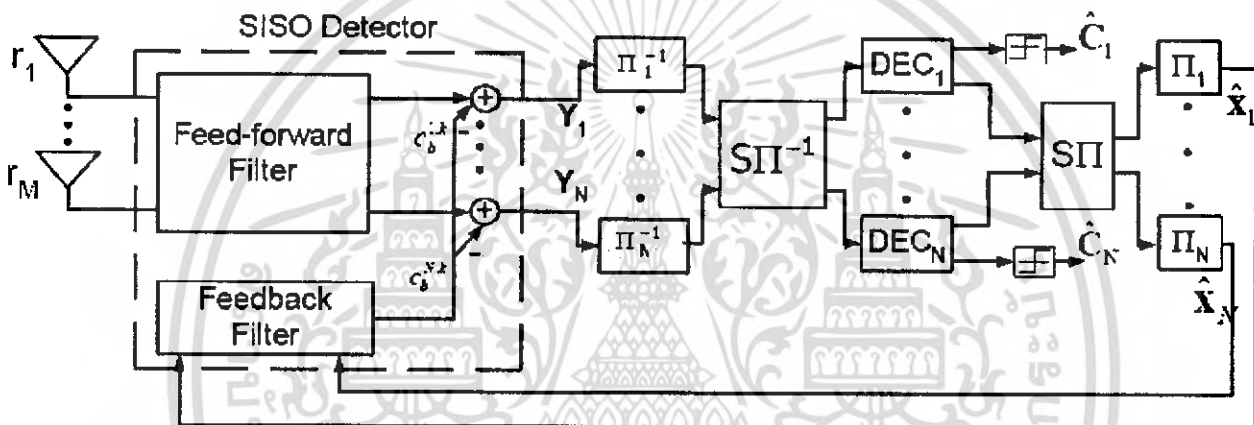
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โครงสร้างของระบบฝั่งรับ

3.2.1 โครงสร้างของระบบฝั่งรับในเชิงเวลา

โครงสร้าง iterative LSTC receiver จะประกอบด้วย 2 ชั้นตอน คือ soft-input soft-output (SISO) detector ตาม N parallel SISO channel decoder. กับ Time and spatial deinterleaver และ time and spatial interleaver โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

SISO detector จะใช้ iterative MMSE interference canceller ซึ่งประกอบด้วย feed-forward และ feedback filter



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของวงจรปรับค่าได้แบบวนซ้ำ LSTC ในเชิงเวลา

ในการวนซ้ำครั้งแรกตัวกรองแบบเดินหน้าจะทำการยับยั้งสัญญาณรบกวนแต่จะไม่มีกระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวนเพราะยังไม่มีการประมาณสัญญาณจากเอาต์พุตของตัวถอดรหัสแบบ MAP หลังจากการวนซ้ำครั้งแรกแล้ว ตัวกรองแบบย้อนกลับจะถูกรวมเข้ากับกระบวนการตรวจจับ

สัญญาณประมาณจากเอาต์พุตของตัวถอดรหัสจะถูกส่งกลับไปที่ตัวกรองแบบย้อนกลับเพื่อทำการกำจัดสัญญาณรบกวนจากเสาอากาศอื่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการตรวจจับ สัญญาณที่ถูก ตรวจจับแล้วที่ได้รับจากเอาต์พุตของตัวตรวจจับ MMSE ที่การวนซ้ำที่ k ณ เวลา t ที่เลขอร์ i จะแทนด้วย

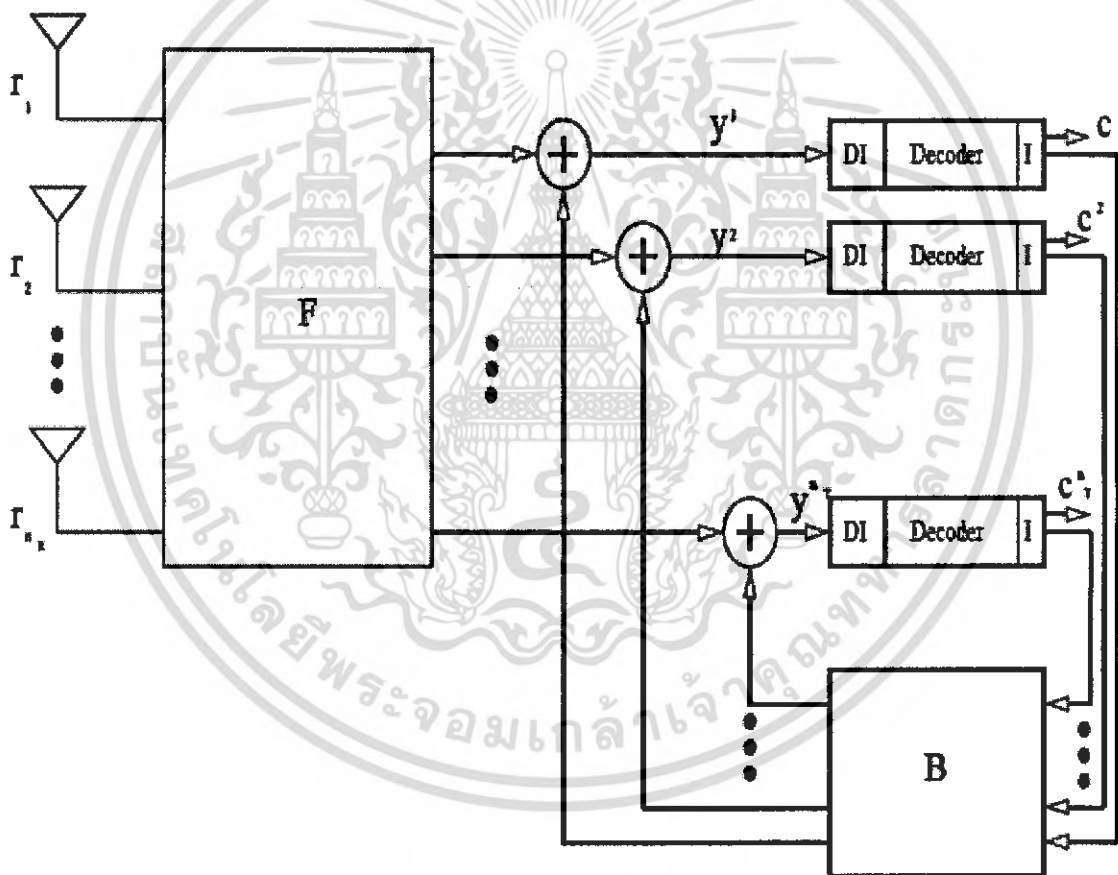
$$y_i^{i,k} = \mathbf{w}_f^{i,k T} \mathbf{r} + \mathbf{w}_b^{i,k T} \hat{\mathbf{x}}^{i,k} \quad (3.2)$$

โดย $w_f^{i,k}$ เป็นค่า สัมประสิทธิ์คั่นหน้า $M \times 1$ ซึ่งมาจาก $w_f = [w_{f,0}, w_{f,1}, \dots, w_{f,M-1}]^T$ และ $w_b^{i,k}$ เป็นเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ย้อนกลับ $(N \times 1) \times 1$

โดย $w_b = [w_{b,0}, w_{b,1}, w_{b,i-1}, w_{b,i+1}, \dots, w_{b,N-1}]^T$ และ $\hat{x}^{i,k}$ เป็นเวกเตอร์ของสัญลักษณ์ประมาณจากเอาต์พุต SISO ของตัวตรวจจับ MAP $(N \times 1) \times 1$ ที่การวนซ้ำครั้งที่ k จากเสาอากาศอื่น

แทนด้วย

$$\hat{\mathbf{x}}^{i,k} = (\hat{x}_i^{1,k}, \hat{x}_i^{2,k}, \dots, \hat{x}_i^{i-1,k}, \hat{x}_i^{i+1,k}, \dots, \hat{x}_i^{N,k}) \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของการวนซ้ำที่ตัวรับ MMSE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมที่ 2 ในสมการที่ 3.2 คือ สัญญาณรบกวนที่ถูกกำจัด แทนด้วยค่าสเกลาร์สัมประสิทธิ์การย้อนกลับ $c_b^{i,k}$

$$c_b^{i,k} = \mathbf{w}_b^{i,kT} \hat{\mathbf{x}}^{i,k} \quad (3.4)$$

ค่าของ $\mathbf{w}_f^{i,k}$ และ $c_b^{i,k}$ จะคำนวณได้โดยค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดระหว่างสัญลักษณ์ที่ถูกส่งมากับสัญลักษณ์ที่ประมาณ

$$e = E[|y_f^{i,k} - x_f^{i,k}|^2] \quad (3.5)$$

สมมติให้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ช่องสัญญาณ \mathbf{H} เป็นเมตริกซ์ที่สมบูรณ์ ให้ \mathbf{H}_i คือคอลัมภ์ที่ i ของเมตริกซ์ช่องสัญญาณ \mathbf{H} ซึ่งเป็นเวกเตอร์ $M \times 1$ เวกเตอร์ของความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นของช่องสัญญาณที่เสาอากาศส่งที่ i , \mathbf{H}_i^H เป็น conjugate transpose ของ \mathbf{H}_i และ $\underline{\mathbf{H}}^i$ เป็นเมตริกซ์ $M \times (N-1)$ ของความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นของช่องสัญญาณที่เสาอากาศส่ง $(N-1)$

$$\mathbf{A} = \mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H \quad (3.6)$$

$$\mathbf{B} = \underline{\mathbf{H}}^i [\mathbf{I}_{N-1} - \text{diag}(\hat{\mathbf{x}}^{i,k} \hat{\mathbf{x}}^{i,kT}) + \hat{\mathbf{x}}^{i,k} \hat{\mathbf{x}}^{i,kT}] \underline{\mathbf{H}}^{iH} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{D} = \underline{\mathbf{H}}^i \hat{\mathbf{x}}^{i,k} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{R} = \sigma^2 \mathbf{I}_M \quad (3.9)$$

โดย \mathbf{I}_{N-1} และ \mathbf{I}_M เป็น $(N-1) \times (N-1)$ และเป็นเมตริกซ์ $M \times M$ ค่าที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์การเดินหน้าและย้อนกลับคือ

$$\mathbf{w}_f^{i,kT} = \mathbf{H}^H (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{R} - \mathbf{D}\mathbf{D}^H)^{-1} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_b^{i,kT} = -\mathbf{w}_f^{i,kT} \mathbf{D} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.10 การคำนวณที่ซับซ้อนของเมตริกซ์ผกผัน $M \times M$ จะประมาณได้เท่ากับ M^3 ดังนั้นอัลกอริทึมปรับค่าได้นี้จะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณได้ สัมประสิทธิ์เดินหน้า $\mathbf{w}_f^{i,k}$ และย้อนกลับ $\mathbf{w}_b^{i,k}$ ในสมการที่ 3.2 จะถูกใช้โดยอัลกอริทึม LMS จะกลายเป็น $\mathbf{w}_f^{i,k}(t)$ และ $\mathbf{w}_b^{i,k}(t)$ สำหรับเวลา t ดังนั้นค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยในสมการที่ 3.5 จะเป็นดังนี้

$$e(t) = E[|\mathbf{w}_f^{i,kT}(t)\mathbf{r} + \mathbf{w}_b^{i,kT}(t)\hat{\mathbf{x}} - x_t^{i,k}|^2] \quad (3.12)$$

$$\mathbf{w}_f^{i,k}(t+1) = \mathbf{w}_f^{i,k}(t) + \mu_f e(t)\mathbf{r}(t) \quad (3.13)$$

$$\mathbf{w}_b^{i,k}(t+1) = \mathbf{w}_b^{i,k}(t) + \mu_b e(t)\hat{\mathbf{x}}(t) \quad (3.14)$$

μ_f และ μ_b เป็นค่าช่วงก้าวของการเดินหน้าและย้อนกลับ

Likelihood function ที่ใช้สำหรับ transmitted modulated symbol 1 and -1 จะแทนด้วย

$$P(y_t^{i,k} | x_t^{i,k} = \pm 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(y_t^{i,k} \pm 1)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3.15)$$

Log-likelihood ratio (LLR) โดยกำหนดให้การวนซ้ำครั้งที่ k สำหรับเลขอร์ที่ i แทนโดย

$$\lambda_i^{i,k} = \log\left(\frac{P(x_t^{i,k} = 1 | y_t^{i,k})}{P(x_t^{i,k} = -1 | y_t^{i,k})}\right) \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Symbol a posteriori probabilities (APP) โดยใช้เงื่อนไขของตัวแปรเอาต์พุตสามารถหาโดย

$$P(x_i^{i,k} = 1 | y_i^{i,k}) = \frac{e^{x_i^{i,k}}}{e^{x_i^{i,k}} + 1} \quad (3.17)$$

$$P(x_i^{i,k} = -1 | y_i^{i,k}) = \frac{e^{-x_i^{i,k}}}{e^{-x_i^{i,k}} + 1} \quad (3.19)$$

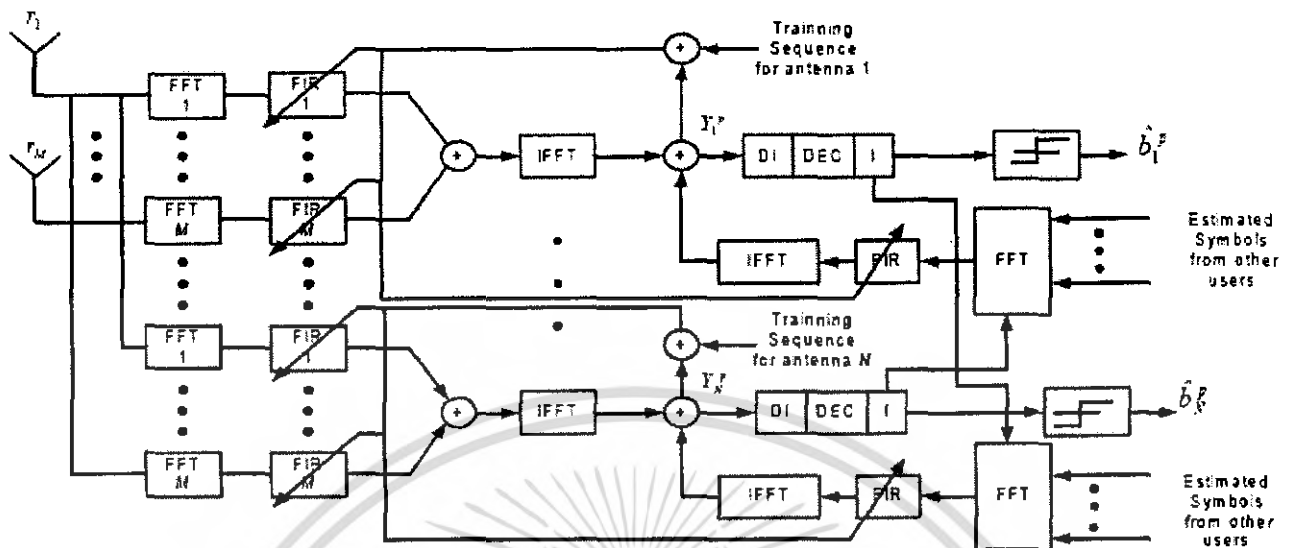
สัญลักษณ์จากเอาต์พุตคำนวณ โดยใช้เลขออร์ที่ i และกวนซ้ำครั้งที่ k คำนวณได้โดย

$$x_i^{i,k} = \frac{e^{x_i^{i,k}} - 1}{e^{x_i^{i,k}} + 1} \quad (3.20)$$

3.2.2 โครงสร้างของระบบฝังรับในเชิงความถี่

โครงสร้างของวงจรปรับค่าได้แบบวนซ้ำ LSTC ในเชิงของความถี่ ในรูปที่ 3.2 จะประกอบด้วยตัวตรวจจับ soft-input soft-output (SISO) และ ช่องสัญญาณขนาน N การสลับตำแหน่งกลับและการสลับตำแหน่ง (Deinterleaver/Interleaver) จะแยกเป็นสองโมดูล

ตัวตรวจจับ SISO นี้จะใช้การวนซ้ำ MMSE ในการกำจัดสัญญาณรบกวน โดยจะมีตัวกรองในเชิงของความถี่แบบเคลื่อนหน้าและย้อนกลับ ส่วนโมดูลการสลับตำแหน่งกลับจะใช้ในเชิงของเวลาและสัญญาณที่ได้จากการประมาณจากการถอดรหัสจะถูกสลับตำแหน่งในเชิงของเวลาด้วย เอาต์พุตที่ได้จะถูกนำกลับมาใช้เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนในการวนซ้ำครั้งต่อไป



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของวงจรปรับค่าได้แบบวนซ้ำ LSTC ในเชิงของความถี่

สัญญาณที่ได้รับจากเสาอากาศทั้งหมดขั้นแรกจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของเชิงความถี่โดยใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) และจะถูกส่งต่อไปยังตัวกรองแบบเดินหน้า การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็วจะแปลงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากตัวกรองแบบเดินหน้าในเชิงความถี่ให้อยู่ในเชิงของเวลา และจะเก็บสัญญาณนี้เพื่อใช้ในกระบวนการต่อไป

สัญญาณที่ได้รับ r_t จากเสาอากาศ M ในช่วงเวลา t ที่ถูกแปลงให้อยู่ในเชิงความถี่โดยใช้ FFT เอาต์พุตจาก โมดูล FFT แทนด้วย Ω_t

$$\Omega_t = fft(r_t) \quad (3.21)$$

โดย $\Omega_t = [\Omega_t^1, \Omega_t^2, \dots, \Omega_t^q, \dots, \Omega_t^M]$

$$\Omega_t^q = \sum_{l=0}^{M-1} r_t^l e^{-\frac{j2\pi ml}{M}} \quad (3.22)$$

FFT(.) เป็นการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว และ $\Omega_t^q, q = 1, \dots, M$ เป็นสัญญาณที่ได้จากเสาอากาศรับ M ที่เวลา t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ $w_{f,i}^{i,k}(t)$ เป็นเวกเตอร์สัมประสิทธิ์แบบเดินหน้าในเชิงเวลา $M \times 1$ สำหรับเสาอากาศส่งคลื่นที่ i ในระหว่างการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t

$$w_{f,i}^{i,k}(t) = [w_{f,i,0}^{i,k}(t), \dots, w_{f,i,q}^{i,k}(t), \dots, w_{f,i,M-1}^{i,k}(t)]^T \quad (3.23)$$

โดย $w_{f,i,q}^{i,k}(t), q = 1, \dots, M$ เป็นสัมประสิทธิ์แบบเดินหน้าที่มาจากเสาอากาศรับคลื่นที่ q

ให้ $\psi_{f,i}^{i,k}$ แทนการแปลงสัญญาณฟูริเยร์แบบเร็วของ $w_{f,i}^{i,k}(t)$

$$\psi_{f,i}^{i,k} = \text{fft}(w_{f,i}^{i,k}(t)) \quad (3.24)$$

ซึ่ง $\psi_{f,i}^{i,k} = [\psi_{f,i,0}^{i,k}(0), \dots, \psi_{f,i,q}^{i,k}(q), \dots, \psi_{f,i,M-1}^{i,k}(M-1)]$

$$\text{และ } \psi_{f,i,q}^{i,k}(q) = \sum_{l=0}^{M-1} w_{f,i,q}^{i,k}(l) e^{-j2\pi ql/M}$$

ซึ่ง $\psi_{f,i,q}^{i,k}(q)$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์แบบเดินหน้าสำหรับเสาอากาศส่งคลื่นที่ i ส่งผ่านไปยังเสาอากาศรับคลื่นที่ q ในระหว่างการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t จากนั้น Ω_i จะส่งไปยังตัวกรองแบบเดินหน้าจะถูกรวมกับค่าสัมประสิทธิ์ $\psi_{f,i}^{i,k}$ ในเชิงความถี่ เอาต์พุตของตัวกรองแบบเดินหน้าสำหรับการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t และสำหรับเสาอากาศคลื่นที่ i แทนด้วย $\bar{F}_i^{i,k}$

$$\bar{F}_i^{i,k} = \text{diag}(\Omega_i)^H \cdot \psi_{f,i}^{i,k} \quad (3.25)$$

ซึ่ง $\text{diag}(\cdot)$ และ $(\cdot)^H$ เป็นเมตริกซ์ทแยงมุม และเป็นฟังก์ชันเปลี่ยนตำแหน่งรวม

$\bar{F}_i^{i,k}$ จะถูกแปลงกลับให้อยู่ในรูปเชิงเวลาโดยการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (IFFT) เอาต์พุตตัวกรองแบบเดินหน้าสำหรับเสาอากาศคลื่นที่ i ระหว่างการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t จะเป็น

$$\mathbf{F}_t^{i,k} = \text{fft}(\bar{\mathbf{F}}_t^{i,k}) \quad (3.26)$$

ซึ่ง

$$\mathbf{F}_t^{i,k} = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} \bar{\mathbf{F}}_t^{i,k} e^{-\frac{j2\pi}{M} l} \quad (3.27)$$

ให้ $\bar{\mathbf{F}}_t^{i,k}$ เป็นเอาต์พุตตัวกรองแบบเดินหน้าในเชิงเวลาสำหรับเสาอากาศต้นที่ i ระหว่างการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t

$$\mathbf{F}_t^{i,k} = \mathbf{I}_F \cdot \bar{\mathbf{F}}_t^{i,k} \quad (3.28)$$

โดย \mathbf{I}_F เป็น $\mathbf{I}_F = [1 \ 0_{M-1}]$ และ 0_{M-1} เป็นความยาวแถวของเวกเตอร์ที่เป็นศูนย์ทั้งหมด ในการวนซ้ำครั้งแรก ตัวกรองแบบเดินหน้าจะทำการยับยั้งสัญญาณรบกวนแต่จะไม่มีกระบวนการกำจัดเพราะจะไม่มีสัญญาณที่ถูกประมาณจากเอาต์พุตของตัวถอดรหัส MAP หลังจากการวนซ้ำครั้งแรกตัวกรองแบบย้อนกลับที่รวมอยู่ในกระบวนการตรวจจับสัญญาณที่ได้จากการประเมินจากเอาต์พุตของตัวถอดรหัสจะถูกส่งกลับไปยังตัวกรองแบบย้อนกลับเพื่อทำการกำจัดสัญญาณรบกวนเสาอากาศอื่นในกระบวนการตรวจจับ ค่าประมาณสัญญาณจากเอาต์พุตของตัวถอดรหัสจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของเชิงความถี่และส่งผ่านไปยังตัวกรองแบบย้อนกลับ เอาต์พุตจาก FFT คือ $\Lambda_t^{i,k}$ ที่ช่วงเวลา t จะแสดงได้ดังนี้

$$\Lambda_t^{i,k} = \text{fft}(\hat{\mathbf{x}}_t^{i,k}) \quad (3.29)$$

โดย $\Lambda_t^{i,k} = [\Lambda_{t,1}^{i,k}, \dots, \Lambda_{t,b}^{i,k}, \dots, \Lambda_{t,N-1}^{i,k}]$

$$\text{และ } \Lambda_{t,a}^{i,k} = \sum_{m=1}^{KN-1} x_{t,m} e^{-\frac{j2\pi am}{KN-1}}; a \in (1 \dots N-1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $\hat{x}_i^{i,k}$ เป็นเวกเตอร์ค่าประมาณสัญลักษณ์แบบอ่อน $(N-1) \times 1$ ที่การวนซ้ำครั้งที่ k ที่ได้จากตัวถอดรหัส MAP จากเสาอากาศต้นที่ i ที่เวลา t

$$\hat{x}_i^{i,k} = (\hat{x}_i^{1,k}, \hat{x}_i^{2,k}, \dots, \hat{x}_i^{i-1,k}, \hat{x}_i^{i+1,k}, \dots, \hat{x}_i^{N,k}) \quad (3.30)$$

ให้ $w_b^{i,k}(t)$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวกรองแบบย้อนกลับในเชิงเวลา ของเสาอากาศส่ง $(N-1) \times 1$ ที่การวนซ้ำครั้งที่ k ที่ได้จากตัวถอดรหัส MAP จากเสาอากาศต้นที่ i ที่เวลา t

$$w_b^{i,k}(t) = [w_b^{1,k}(t), \dots, w_b^{i-1,k}(t), w_b^{i+1,k}(t), \dots, w_b^{N,k}(t)] \quad (3.31)$$

ให้ $\psi_{i,b}^{i,k}$ แทน FFT ของ $w_b^{i,k}(t)$

$$\psi_{i,b}^{i,k} = \text{fft}(w_b^{i,k}(t)) \quad (3.32)$$

ซึ่ง $\psi_{i,b}^{i,k} = [\psi_{i,b}^{i,k}(0), \dots, \psi_{i,b}^{i,k}(a), \dots, \psi_{i,b}^{i,k}(N-2)]$

$$\text{และ } \psi_{i,b}^{i,k}(a) = \sum_{m=0}^{N-2} w_b^{i,k}(m) e^{-j2\pi am / (N-1)}$$

เอาต์พุตของ FFT แทนด้วย $\Lambda_i^{i,k}$ จะถูกประยุกต์ใช้ในตัวกรองแบบย้อนกลับด้วยสัมประสิทธิ์การย้อนกลับในเชิงความถี่ $\psi_{i,b}^{i,k}$ เพื่อเตรียมสำหรับการคอนโวลูชันเชิงความถี่ สัญญาณเอาต์พุตจากตัวกรองแบบย้อนกลับแทนด้วย $\bar{F}_{i,b}^{i,k}$ ที่ช่วงเวลา t

$$\bar{F}_{i,b}^{i,k} = (\text{diag}(\Lambda_i^{i,k})^H \cdot \psi_{i,b}^{i,k}) \quad (3.33)$$

$\bar{F}_{i,b}^{i,k}$ ถูกแปลงกลับให้อยู่ในเชิงของเวลาด้วย IFFT เอาต์พุตตัวกรองแบบย้อนกลับสำหรับเสาอากาศต้นที่ i ของผู้ใช้ p ในการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t

$$F_{i,b}^{i,k} = \text{ifft}(\bar{F}_{i,b}^{i,k}) \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย
$$\mathbf{F}_{t,b}^{i,k} = \frac{1}{N-1} \sum_{m=0}^{N-2} \bar{\mathbf{F}}_{t,b}^{i,k} e^{\frac{-j2\pi m}{KN-1}} \quad (3.35)$$

ให้ $\mathbf{F}_{t,b}^{i,k}$ แทนเอาต์พุตตัวกรองแบบย้อนกลับเชิงเวลาจากเสาอากาศต้นที่ i ในการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t

$$\mathbf{F}_{t,b}^{i,k} = \mathbf{I}_B \cdot \mathbf{F}_{t,b}^{i,k} \quad (3.36)$$

ซึ่ง $\mathbf{I}_B = [1 \ 0_{N-1}]$ และ 0_{N-1} เป็นเวกเตอร์แถวที่เป็นศูนย์ทั้งหมดยาว $N-1$ เอาต์พุตที่ถูกตรวจจับได้ในสมการที่ 3.35 จะเป็นสัญญาณรบกวนจากเสาอากาศอื่นในระบบ (Co-channel Interference)

สัญลักษณ์ที่ตรวจจับได้ที่ได้รับมาจากเอาต์พุตของตัวตรวจจับปรับค่าได้ในเชิงความถี่ จากเสาอากาศต้นที่ i ในการวนซ้ำครั้งที่ k ที่เวลา t จะแทนด้วย $y_i^{i,k}$

$$y_i^{i,k} = F_i^{i,k} + F_i^{p,k} \quad (3.37)$$

โดย $F_i^{i,k}$ และ $F_i^{p,k}$ จะแทนเอาต์พุตตัวกรองแบบเดินหน้าและย้อนกลับในเชิงเวลาที่แสดงในสมการที่ 3.28 และ 3.36 เวกเตอร์สัมประสิทธิ์แบบเดินหน้า $w_f^{i,k}(t)$ และแบบย้อนกลับ $w_b^{i,k}(t)$ ในสมการที่ 3.23 และ 3.31 จะคำนวณโดยใช้อัลกอริทึมปรับตัวได้แบบ LMS

$$\xi = E[|e(t)|^2] = E[|y_i^{i,k} - x_i^{i,k}|^2] \quad (3.38)$$

โดย $y_i^{i,k}$ เป็นเอาต์พุตตัวกรองหัดแบบอ่อนในเชิงเวลาและใช้อัลกอริทึม LMS ได้ดังนี้

$$y_i^{i,k} = w_f^{i,kH}(t)r_t + w_b^{i,kH}(t)\hat{x}_t \quad (3.39)$$

ใช้สมการ 3.38 และ 3.39 ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ $w_f^{i,k}(t)$ และ $w_b^{i,k}(t)$ ในเวลา t ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของอัลกอริทึมแบบ LMS คือ

$$\xi = E[|w_f^{i,kT}(t)r_t + w_b^{i,kT}(t)\hat{x}_t - x_t^{i,k}|^2] \quad (3.40)$$

ซึ่ง

$$w_f^{i,k}(t+1) = w_f^{i,k}(t) + \mu_f e(t)r_t \quad (3.41)$$

และ

$$w_b^{i,k}(t+1) = w_b^{i,k}(t) + \mu_b e(t)\hat{x}_t \quad (3.42)$$

โดย μ_f และ μ_b เป็นค่าช่วงก้าวของการปรับเปลี่ยนแบบไปข้างหน้าและย้อนกลับในโครงสร้างฝั่งรับ เป็นที่รู้กันดีว่าตัวถอดรหัส SISO MAP นั้นจะใช้เอาต์พุตจากตัวตรวจจับ $y_t^{i,k}$ ซึ่งเป็นอินพุตแบบอ่อนเพื่อถอดรหัส เอาต์พุตแบบอ่อนจากตัวถอดรหัสจะถูกใช้คำนวณหาการรบกวนซึ่งจะหักล้างจากอินพุตตัวถอดรหัสในการวนซ้ำครั้งต่อไป กระบวนการวนซ้ำในการตรวจจับและถอดรหัสจะถูกทำไปเรื่อยๆจนกระทั่งค่าประมาณสัญลักษณ์ได้ประสิทธิภาพที่ดี เอาต์พุตแบบอ่อนจากตัวถอดรหัสในการวนซ้ำครั้งสุดท้ายจะถูกป้อนเข้าไปในกระบวนการตัดสินใจ สำหรับการมอดูเลต BPSK นั้นอัตราส่วน Likelihood ในการวนซ้ำครั้งที่ k และเลขอร์ฝั่งส่ง i แทนด้วย $\lambda_t^{i,k}$

$$\lambda_t^{i,k} = \log\left(\frac{P(x_t^{i,k} = 1 | y_t^{i,k})}{P(x_t^{i,k} = -1 | y_t^{i,k})}\right) \quad (3.43)$$

ค่าประมาณสัญลักษณ์เอาต์พุตแบบอ่อน ในเลขอร์ i การวนซ้ำครั้งที่ k แทนด้วย

$$x_t^{i,k} = \frac{e^{\lambda_t^{i,k}} - 1}{e^{\lambda_t^{i,k}} + 1} \quad (3.44)$$

3.3 การกำหนดตัวแปรในระบบ

- กำหนดจำนวนเสาอากาศส่งและเสาอากาศรับ
- กำหนดจำนวนบิตข้อมูล โดยระบบจะใช้จำนวนบิตข้อมูล 130 บิตต่อเสาอากาศส่ง 1 เสา
- กำหนดรหัสที่จะใช้ในการส่งในโปรแกรมจำลองจะกำหนดเป็นเลขฐานสองคือ 1101 และ 1111
- กำหนดอัตราเข้ารหัสเท่ากับ 0.5
- กำหนดจำนวนครั้งในการวนซ้ำของข้อมูล
- กำหนดค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน SNR เท่ากับ 14

3.4 การหาประสิทธิภาพของระบบ

นำค่าที่ได้จากการรัน โปรแกรมจำลองมาทำการพลอตกราฟระหว่างค่า BER ต่อค่า E_b/N_0 ของระบบเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบในเชิงเวลาและเชิงความถี่ จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองแบบ

บทที่ 4

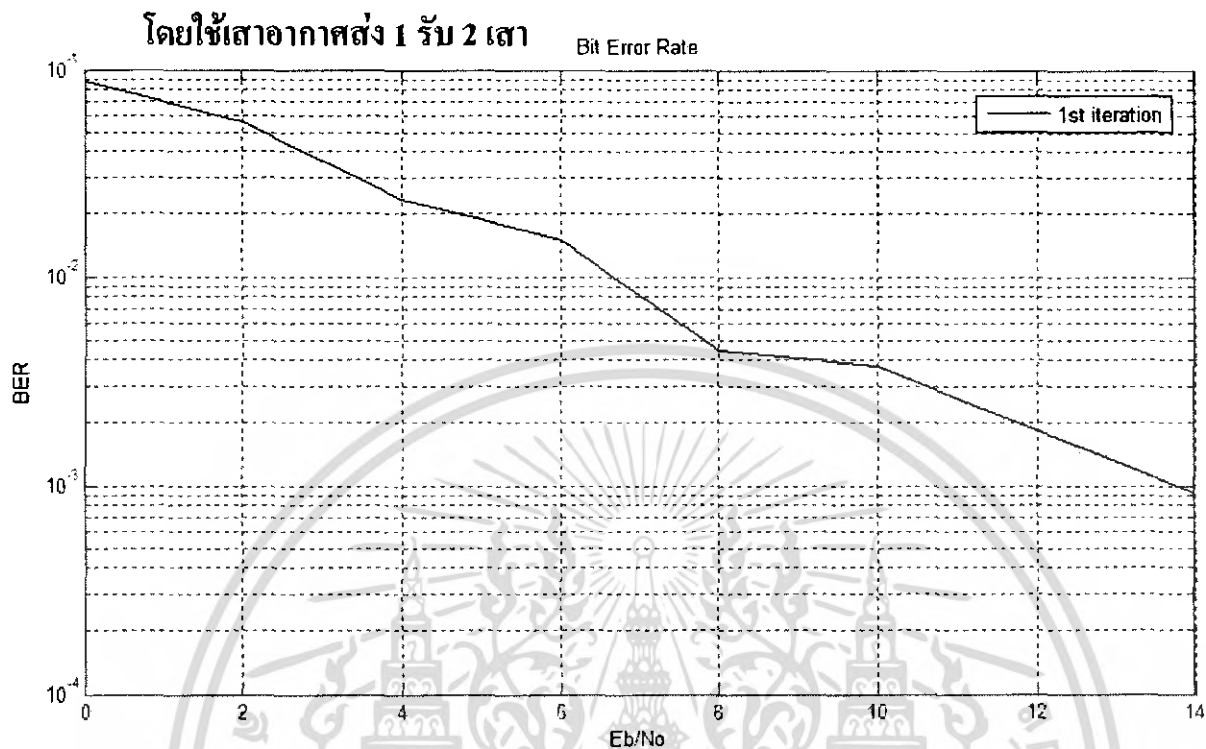
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นผลการทดลองที่ได้จากการจำลองการทำงานของฝั่งรับ LSTC แบบปรับตัว ได้เชิงความถี่ด้วยการใช้การมอดูเลตแบบ BPSK ในช่องสัญญาณการจาง quasi-static โดย สัมประสิทธิ์การจางจะเป็นค่าคงที่ภายในเฟรม แต่ค่าสัมประสิทธิ์จะเปลี่ยนไปในแต่ละเฟรมและในแต่ละช่องสัญญาณ ระบบนี้จะทำงานใน Training Mode จนกว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) จะเข้าใกล้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (MMSE) จากนั้นจะทำการเปลี่ยนไปใช้ Decision Directed Mode รหัสที่ถูกสร้างขึ้นจะไม่ใช้รหัสที่เป็นแบบแผนโดยจะมีอัตราเข้ารหัส (R) เป็น 0.5 , มี memory order เท่ากับ 3 และมีรหัสที่ส่งเป็น $g_1=15_8$ และ $g_2=17_8$

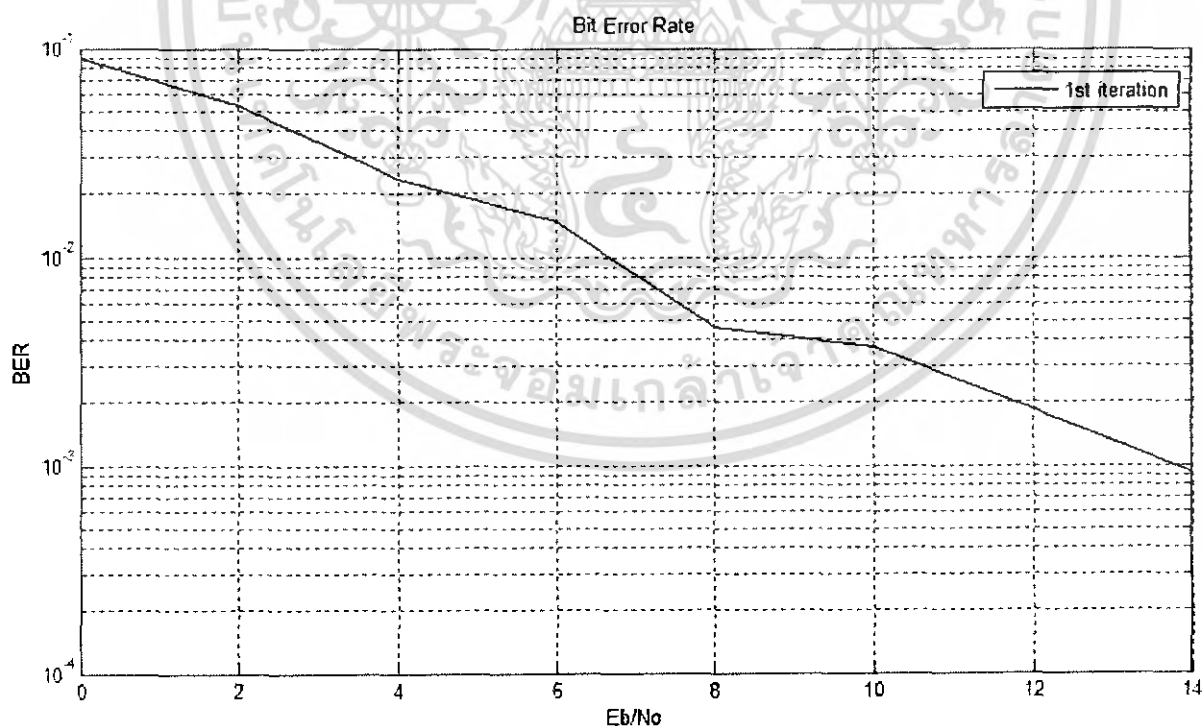
ระบบนี้จะใช้การ โพรแกรมจำลอง เสาอากาศส่ง 1 เสา รับ 2 เสาและเสาอากาศส่ง 1 เสา รับ 4 เสา ที่มีจำนวนการวนซ้ำเท่ากับ 1 และเสาอากาศส่ง 2 รับ 1 เสา, เสาอากาศส่ง 2 เสา รับ 2 เสา และเสาอากาศส่ง 2 เสา รับ 4 เสาที่มีจำนวนการวนซ้ำเท่ากับ 8 ทั้งในเชิงเวลาและเชิงความถี่ ระบบจะใช้บิตข้อมูล 130 บิตต่อเสาอากาศส่ง 1 เสา ในแต่ละเลขอร์ของระบบจะประกอบด้วย 130 บิตข้อมูลและทั้งหมดจะถูกเข้ารหัสด้วยตัวเข้ารหัสช่องสัญญาณ

ผลการทดลองจะแสดงการเปรียบเทียบอัตราบิตผิดพลาดเฉลี่ย (BER) ต่ออัตราส่วนของ พลังงานเฉลี่ยต่อบิต (E_b) กับ ความหนาแน่นพลังงานสเปกตรัมของสัญญาณรบกวนขาว (N_0)

4.1 กราฟแสดงค่าผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการวนซ้ำ 1 รอบ



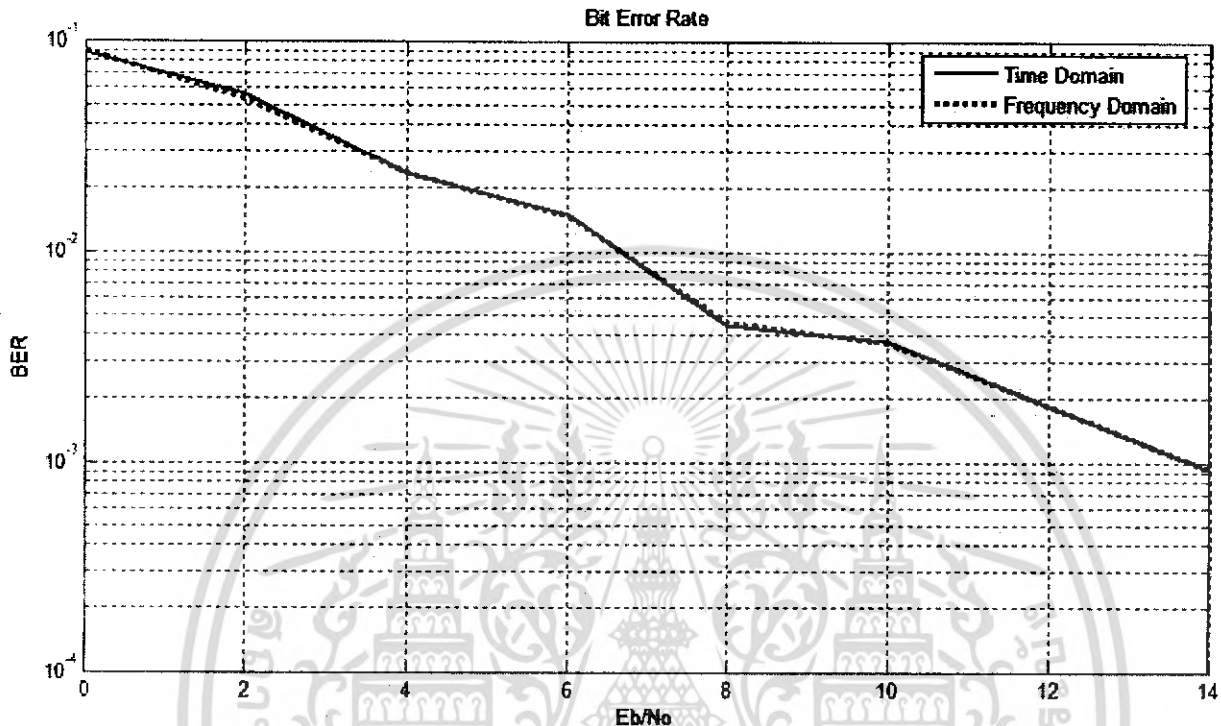
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจากเสาอากาศส่ง 1 รับ 2 ในเชิงเวลา



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจาก เสาอากาศส่ง 1 รับ 2 ในเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลใน เชิงเวลาและเชิงความถี่ที่มีการวนซ้ำ 1 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 2 เสา

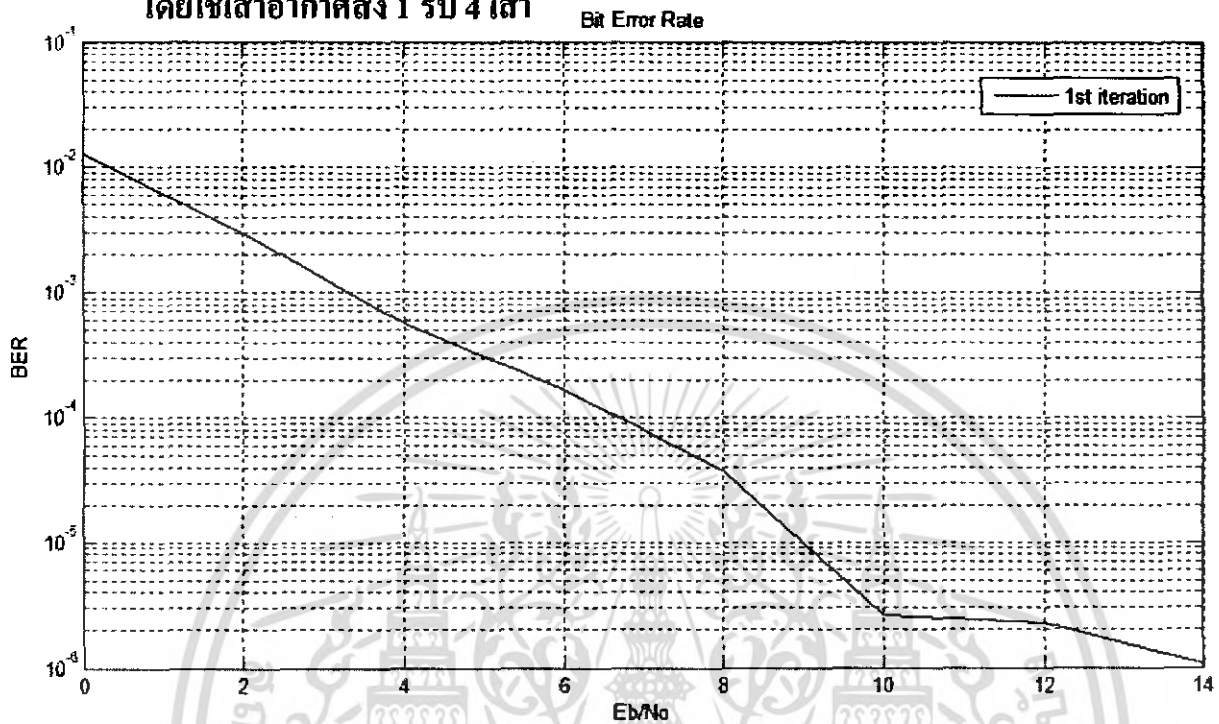


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 2

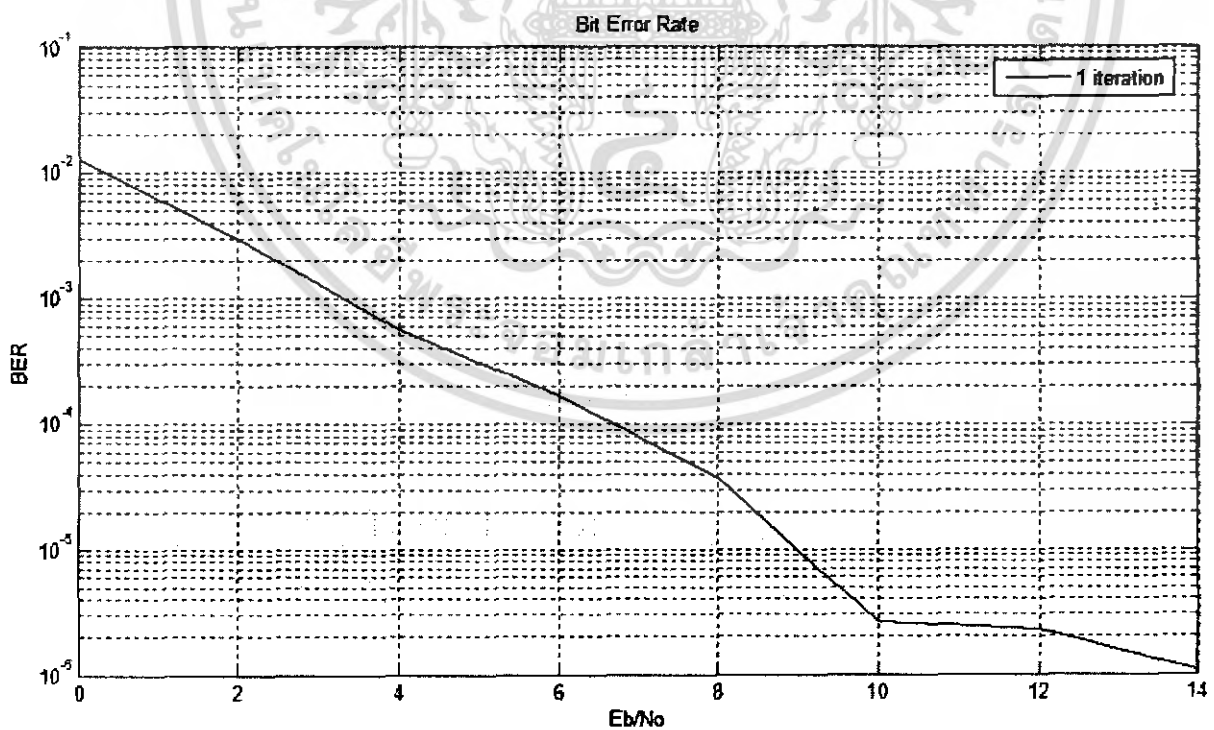
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กราฟแสดงค่าผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการวนซ้ำ 1 รอบ

โดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 4 เสา



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจากเสาอากาศส่ง 1 รับ 4 ในเชิงเวลา

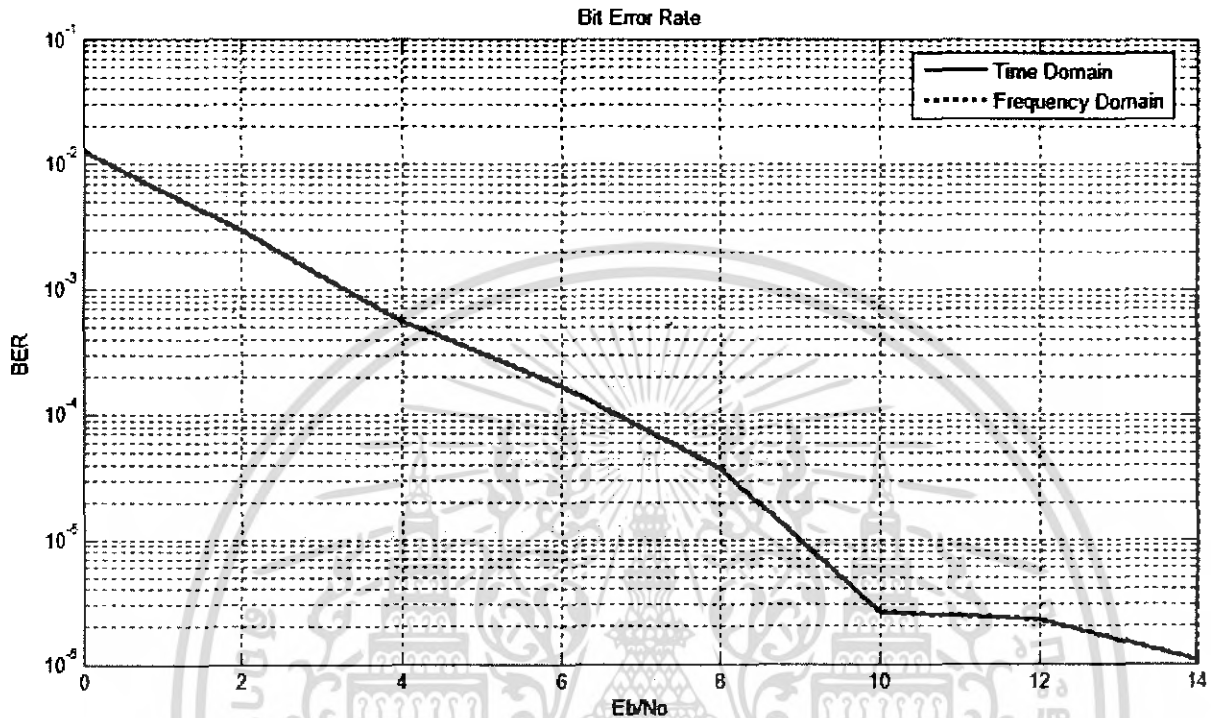


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจากเสาอากาศส่ง 1 รับ 4

ในเชิงความถี่

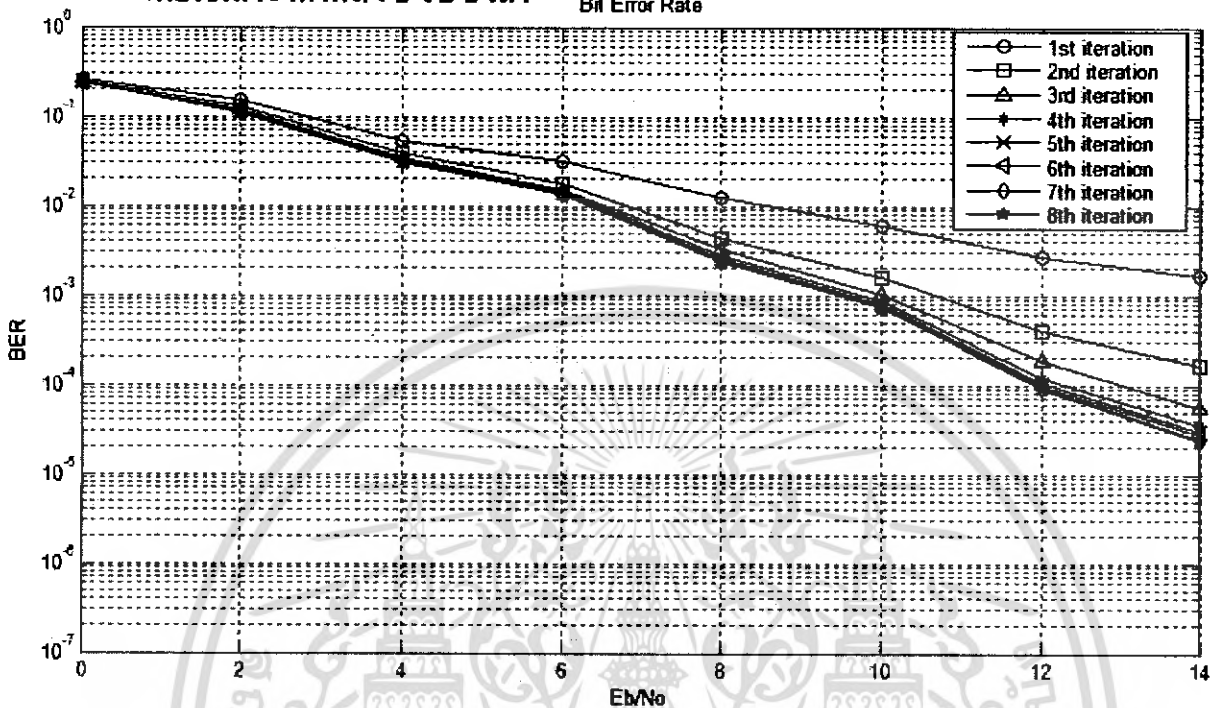
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลใน เชิงเวลาและเชิงความถี่ที่มีการวนซ้ำ 1 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 4 เสา

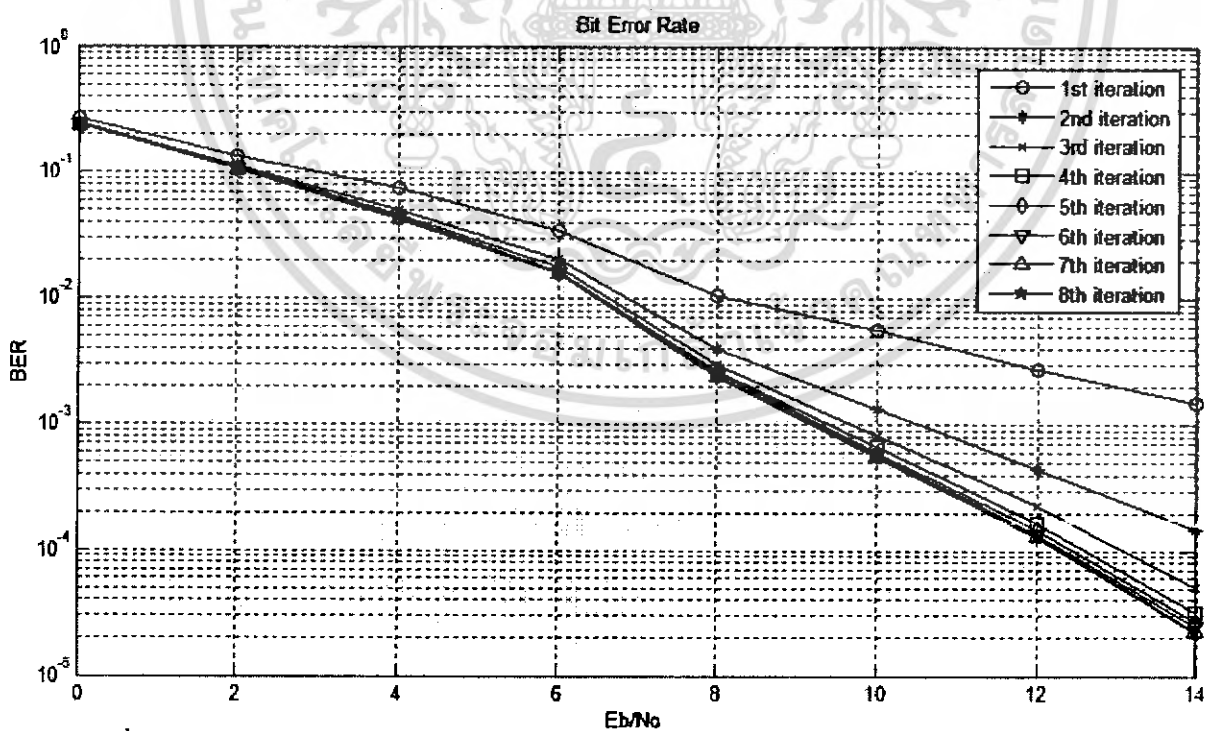


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 1 รับ 4

4.5 กราฟแสดงค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการวนซ้ำ 8 รอบ
โดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 2 เสา



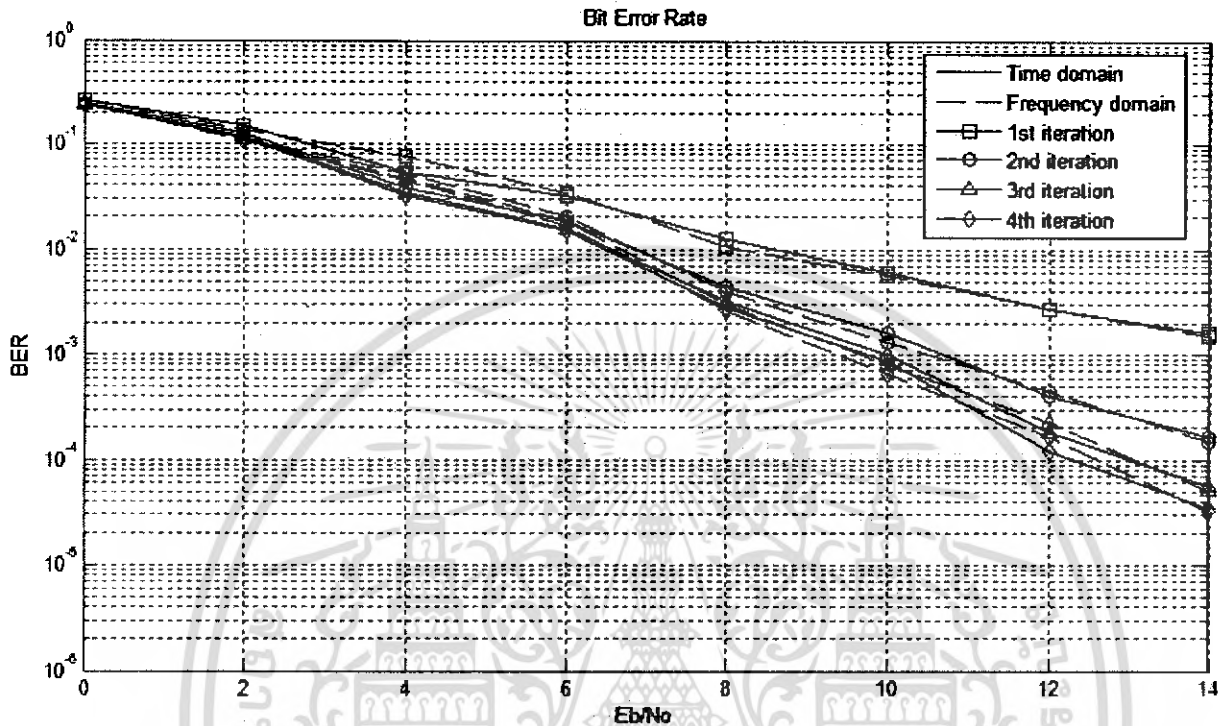
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจากเสาอากาศส่ง 2 รับ 2 ในเชิงเวลา



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่า BER จาก โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจากเสาอากาศส่ง 2 รับ 2
ในเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

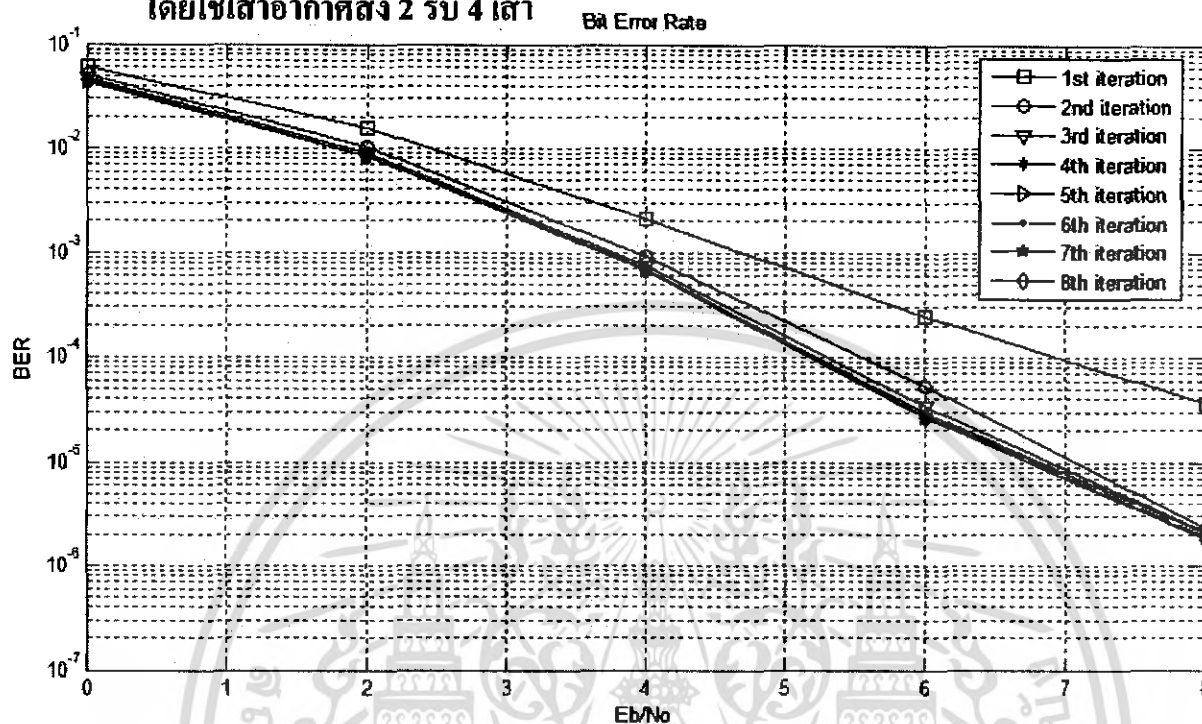
4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการวนซ้ำ 8 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 2 เสา



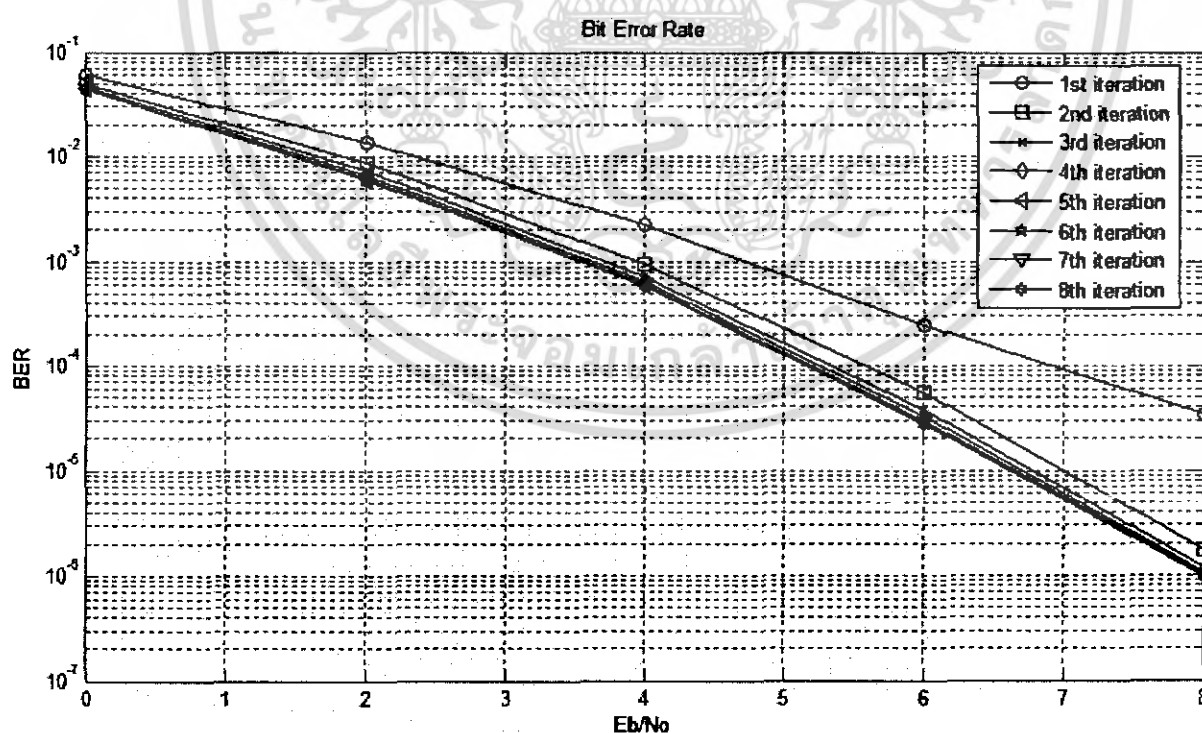
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 2

4.7 กราฟแสดงค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการวนซ้ำ 8 รอบ

โดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 4 เสา



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจากเสาอากาศส่ง 2 รับ 4 ในเชิงเวลา

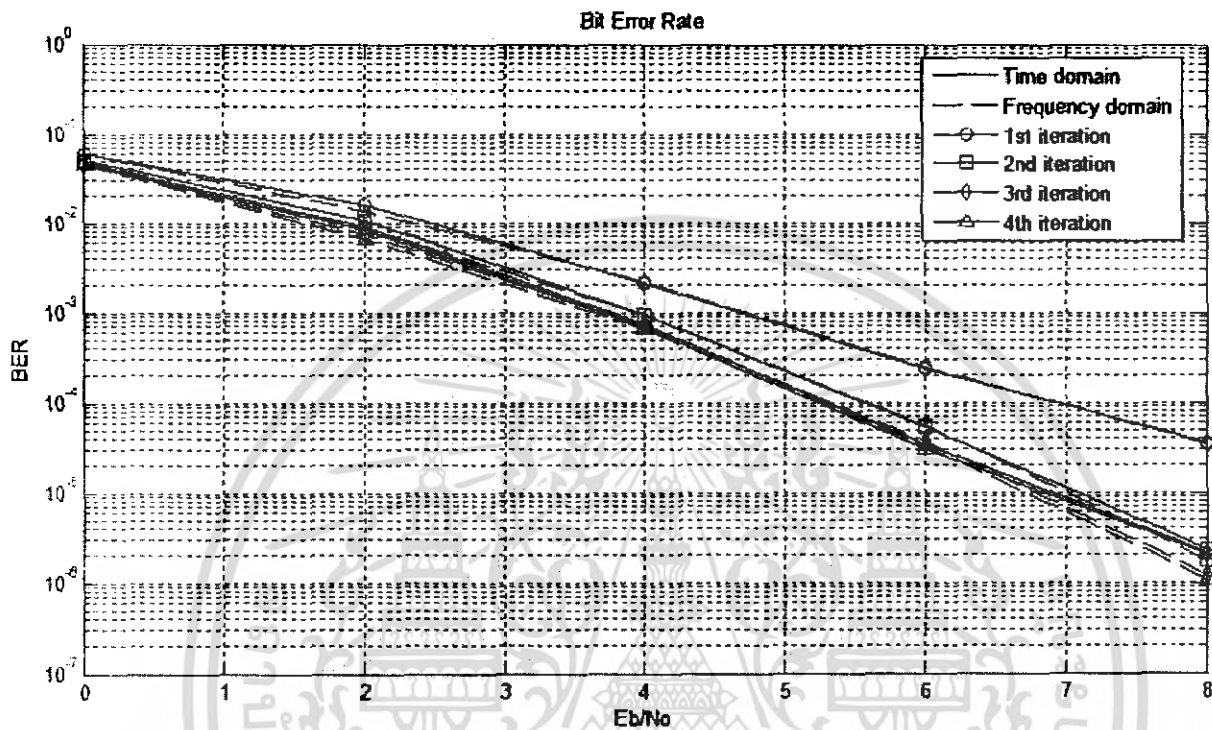


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลจากเสาอากาศส่ง 2 รับ 4

ในเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบิตผิดพลาดจากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการวนซ้ำ 8 รอบโดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 4 เสา



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงความถี่โดยใช้เสาอากาศส่ง 2 รับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุปผลการทดลองของระบบ

จากกราฟในการจำลองระบบที่มีการส่งข้อมูลด้วยเสาอากาศส่ง 1 รับ 2 ที่มีการวนซ้ำเท่ากับ 1 นั้นจะมีประสิทธิภาพในการรับข้อมูลที่เท่ากันทั้งในเชิงเวลาและควมดี เช่นเดียวกับระบบที่มีการส่งข้อมูลด้วยเสาอากาศส่ง 1 รับ 4 ที่มีการวนซ้ำเท่ากับ 1 ก็จะมีประสิทธิภาพที่เท่ากันทั้งในเชิงเวลาและเชิงควมดี แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของทั้งสองระบบจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของระบบที่มีการส่งข้อมูลด้วยเสาอากาศส่ง 1 รับ 4 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการมีเสาอากาศรับมากกว่า ทำให้มี diversity gain ที่มากกว่าด้วยคั้งนั้นการรับข้อมูลจึงดีกว่าด้วย

จากกราฟ ในการจำลองระบบที่มีการส่งข้อมูลด้วยเสาอากาศส่ง 2 รับ 2 และเสาอากาศส่ง 2 รับ 4 ที่มีการวนซ้ำเท่ากับ 8 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนการวนซ้ำมากขึ้นประสิทธิภาพของระบบจะค่อยๆดีขึ้นเรื่อยๆจนถึงระดับคั้งที่ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในเชิงเวลาและเชิงควมดีระบบที่มีการส่งข้อมูลด้วยเสาอากาศส่ง 2 รับ 2 จะมีประสิทธิภาพที่เท่ากันทั้งในเชิงเวลาและควมดี ส่วนระบบที่มีการส่งข้อมูลด้วยเสาอากาศส่ง 2 รับ 4 ประสิทธิภาพของระบบในเชิงควมดีจะดีกว่าในเชิงเวลาเล็กน้อย

4.6 เปรียบเทียบความซับซ้อนในการคำนวณของระบบในเชิงเวลาและเชิงควมดี

ในการคำนวณของคั้งรับวนซ้ำแบบปรับค่าได้ในเชิงเวลาโดยใช้อัลกอริทึม LMS ที่มีเสาอากาศส่งจำนวน N และเสาอากาศรับจำนวน M จะใช้ $2M+1$ สำหรับตัวกรองแบบเดินหน้าและใช้ $2(N-1)+1$ สำหรับตัวกรองแบบย้อนกลับ คั้งนั้นการคำนวณของคั้งระบบจะเป็น $NI(2M+2N)$ โดยที่ I คือจำนวนการวนซ้ำคั้งหมดในการตรวจจับ

ส่วนการคำนวณของคั้งรับแบบปรับค่าได้ในเชิงควมดีโดยใช้อัลกอริทึม LMS นั้นจะใช้ $\log_2(2M+1)$ สำหรับตัวกรองแบบเดินหน้า และ $\log_2(2(N-1)+1)$ สำหรับตัวกรองแบบย้อนกลับ คั้งนั้นการคำนวณของคั้งระบบจะเท่ากับ $NI(\log_2(2M+1)+\log_2(2N-1))$ โดยที่ I เป็นจำนวนการวนซ้ำคั้งหมดในการตรวจจับ

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของระบบในเชิงควมดีจะดีกว่าหรือเทียบเท่ากับระบบในเชิงเวลาและจะมีความซับซ้อนในการคำนวณที่น้อยกว่าด้วย

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปการพัฒนาโครงการ

ในระบบ MIMO ตัวรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำในเชิงความถี่ จะทำการรวมตัวตรวจจับปรับค่าได้แบบวนซ้ำและ โครงสร้างการถอดรหัส ตัวรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำนี้จะช่วยลดปัญหาของสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณที่ติดกัน โดยการใช้เทคนิคกำจัดและยับยั้งการรบกวน ความซับซ้อนในการคำนวณจะเกิดขึ้นในส่วนของ การตรวจจับเท่านั้น ในการเปรียบเทียบการทำงานของระบบในเชิงเวลาและเชิงความถี่ ตัวรับในเชิงความถี่นั้นจะมีการคำนวณที่ซับซ้อนน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ในการส่งสัญญาณนั้นจำเป็นต้องใช้ลำดับเทรนนึ่งในการเริ่มต้นการจำลองทุกครั้ง

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค

การทำงานของโปรแกรมจำลองตัวรับปรับค่าได้แบบวนซ้ำในเชิงความถี่นั้นจะใช้เวลาในการประมวลผลนาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรที่กำหนดโดยตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ จำนวนของเสาอากาศส่งและรับ, จำนวนของบิตข้อมูลซึ่งจะสัมพันธ์กับจำนวนเสาอากาศ และจำนวนในการวนซ้ำของตัวรับ ทำให้ต้องทำการรันโปรแกรมใหม่ทุกครั้งที่มีการปรับเปลี่ยนค่า ดังนั้นเพื่อที่จะให้การทำงานเร็วขึ้นจึงควรเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีตัวประมวลผลกลาง (CPU) ที่มีความเร็วสูง และหน่วยความจำที่มาก

5.3 ข้อจำกัดของโครงการที่พัฒนา

ในการจำลองการทำงานของโปรแกรมนั้น ในตอนแรกจำเป็นต้องส่งลำดับของข้อมูล (Training Sequence) ทุกครั้ง รวมถึงความยาวของลำดับข้อมูล ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพของการทำงานต่ำลง

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อ

ออกแบบโปรแกรมจำลองโดยใช้อัลกอริทึมแบบอื่นๆ และทำการเปรียบเทียบเพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดและมีการประมวลผลที่เร็วขึ้น เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเสาอากาศที่ใช้ในการสื่อสารได้จริง

บรรณานุกรม

G.J Foschini and M.J. Gans. 1996. **Layeres space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antenna.** ,Bell Labs. Techn. J., vol. 1, pp. 41-59

Branka Vucetic and Jinhong Yuan. 2003. **Space-time coding.** John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-84757-3

J.S. Lim. 1999. **Fast adaptive filtering algorithm based on exponentially weighted least-square errors.**, Electron Lett., vol. 35 no. 22 pp. 1913-1915

S.S. Haykin. 2002 , **Adaptive filter theory.** ,Upper Saddle River ,Prentice Hall.

D.D Falconer and S.L. Ariyavisitakul. 2003. **Broadband wireless using single carrier and frequency domain equalization.** , International Symposium

Mohinder Jankiraman. 2004. **Space-time codes and MIMO systems.** ,Boston.Artech House

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้