

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**เครื่องรับสัญญาณแบบสเปซไทม์ชนิดวนซ้ำปรับค่าได้ที่มีความซับซ้อนต่ำ
สำหรับการสื่อสารในยุคที่ 4**

**Low Complexity Adaptive Iterative Combined Space-Time Receiver
For 4G Communication**



โดย

นางสาวมณีรัตน์ ลีลาวงศ์พิสุทธิ

นางสาวศิริพร บุญจันทร์

รับ
๑๖/๖/๑๖
๒๕๕๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 83226
วัน,เดือน,ปี..... - 6 ส.ค. 2551

b. 119 66506
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LOW COMPLEXITY ADAPTIVE ITERATIVE COMBINED SPACE-TIME
RECEIVER FOR 4G COMMUNICATION**



**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**

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร เครื่องรับสัญญาณแบบสเปซไทม์ชนิดวนซ้ำปรับค่าได้ที่มีความ
ซับซ้อนสำหรับระบบการสื่อสารในยุคที่ 4

ชื่อนักศึกษา นางสาวฉวีรัตน์ ลีลาวงศ์พิสุทธิ รหัสประจำตัว 48015771
นางสาวศิริพร บุญจันทร์ รหัสประจำตัว 42015487

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช
ดร. จักรี ทิฆมภาคย์วิศิษฏ์

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

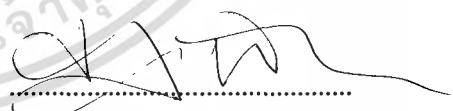
ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2550

ปริญญาบัตรนี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว


.....
(รศ. ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช)

อาจารย์ที่ปรึกษา


.....
(ดร. จักรี ทิฆมภาคย์วิศิษฏ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องรับสัญญาณแบบสเปซไทม์ชนิดวนซ้ำปรับค่าได้ที่มีความซับซ้อนต่ำสำหรับระบบการสื่อสารในยุคที่ 4
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมณีนรัตน์ ลีลาวงศ์พิสุทธิ์ รหัสประจำตัว 48015771 นางสาวศิริพร บุญจันทร์ รหัสประจำตัว 4201 5487
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. กนก เชนจิระพงศ์เวช ๗๗๐ ดร. จักรี ทิมภักย์วิศิษฎ์
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	วิศวกรรมสารสนเทศ 2550

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็น การนำเสนอบทการสื่อสารแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (Multiple-Input Multiple-Output; MIMO) แต่ผลของประสิทธิภาพในการสื่อสารนี้ ถูกจำกัดด้วยสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (co-channel interference; CCI) อันเนื่องมาจากสัญญาณเสาอากาศข้างเคียง

ดังนั้นจึงนำการทำงานแบบวนซ้ำปรับค่าได้ (Adaptive Iterative) มาใช้ในระบบเพื่อจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามกระบวนการทำงานของระบบยังคงมีความซับซ้อนอยู่มาก เพื่อลดความซับซ้อนของระบบจึงนำการทำงานแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงความถี่ (Frequency domain adaptive iterative) มาประยุกต์ใช้กับระบบ

Thesis Title Low Complexity Adaptive Iterative Combined Space-Time Receiver for 4G Communication

ชื่อนักศึกษา Miss Maneerat Leelawongpisut ID 48015771
Miss Siriporn Boonjung ID 48015777

อาจารย์ที่ปรึกษา Assoc. Prof. Dr. Kanok Janchitrapongvej
Dr. Chakree Teekapakvisit

Graduate Level Bachelor Degree of Information Engineering

Department Information Engineering

Academic Year 2007

ปีการศึกษา 2550

ABSTRACT

This project presented for 4G a low complexity adaptive iterative receiver communication systems Multiple-Input Multiple-Output (MIMO). The performance of the proposed system is limited by the co-channel interference (CCI) due to the adjacent antenna's signals.

Such, an adaptive iterative algorithm is utilized to suppress and cancel both the CCI in the systems. However, the systems still has a high computational complexity due to the complexity of the receiver structure. Therefore, a frequency domain adaptive iterative algorithm is utilized to reduce such complexity. The simulation results show that the performance of the system is satisfactory.

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เทคโนโลยีการสื่อสารในยุคต่าง ๆ	3
2.1.1 การสื่อสารในยุคที่ 1G	3
2.1.2 การสื่อสารในยุคที่ 2G	3
2.1.3 การสื่อสารในยุคที่ 2.5 G	3
2.1.4 การสื่อสารในยุคที่ 3G	4
2.1.5 การสื่อสารในยุคที่ 4G	4
2.2 เทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทาง (Multiple Access Technique)	5
2.2.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access; FDMA)	5
2.2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access; TDMA)	6
2.2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบการแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access; CDMA)	7
2.3 รหัสคอนโวลูชัน (Convolutional Code)	10
2.3.1 วิธีการทำงานของวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน	14
2.3.1.1 แผนภาพสถานะ (State Diagram)	14
2.3.1.2 แผนภาพต้นไม้ (Tree Diagram)	15
2.3.1.3 แผนภาพทรีลิส (Trellis Diagram)	16
2.4 อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (MAP Decoding Algorithm)	17
2.5 การวางสลับ (Interleaving)	22
2.5.1 การวางสลับข้อมูลแบบบล็อก (Block Interleaving)	22
2.5.2 การวางสลับข้อมูลแบบสุ่ม (Random Interleaving)	22
2.6 ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.7 วงจรกรองแบบปรับค่าได้ (Adaptive Detector)	25
2.8 เทคนิคการทำไคเวอร์ซิตี (Diversity Techniques)	27
2.8.1 การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity)	28
2.8.2 การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity)	28
2.8.3 การทำสเปซไคเวอร์ซิตี (Space Diversity)	29
2.9 การรวมไคเวอร์ซิตี (Diversity Combining)	30
2.9.1 ซีเล็กทีฟคอมไบนิง (Selective Combining)	30
2.9.2 สวิตช์คอมไบนิง (Switched Combining)	31
2.9.3 อีควอลเกนคอมไบนิง (Equal-Gain Combining; EGC)	32
2.9.4 แมกซิมีลัมเรซีโคมไบนิง (Maximal ratio combining; MCR)	32
2.10 รหัสเลเยอร์สเปซไทม์ (Layer Space-Time Codes)	33
2.10.1 เครื่องส่งปริภูมิเวลา (LST Transmitters)	34
2.10.2 เครื่องรับปริภูมิเวลา (LST Receivers)	39
บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน	41
3.1 การออกแบบภาคส่งสัญญาณ (Transmission structure)	42
3.2 การออกแบบภาครับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative Detector)	43
3.3 การออกแบบภาครับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าในเชิงความถี่ (Frequency Domain Adaptive Iterative Detector)	45
3.4 กระบวนการลดความซับซ้อน	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง	52
4.1 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบระหว่างการใส่เสาอากาศรับและส่งในจำนวนที่แตกต่างกัน	52
4.2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบโดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่แตกต่างกัน	55
4.3 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้ระหว่างเชิงของเวลากับเชิงความถี่	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	61
5.1 สรุปผลการทดลอง	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค	61
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ	62
บรรณานุกรม	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	แนวคิดแบบ FDMA	6
รูปที่ 2.2	แนวคิดแบบ TDMA	6
รูปที่ 2.3	แนวคิดแบบ CDMA	7
รูปที่ 2.4	หลักการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่	9
รูปที่ 2.5	การจัดสัญญาณแทรกสอด ชุดสอง	10
รูปที่ 2.6	วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่ $\text{rate}=1/2, K=3$ [7]	11
รูปที่ 2.7	ตัวอย่างขั้นตอนเข้ารหัสของข้อมูล 101 ของวงจรเข้ารหัสที่ $\text{rate}=1/2, K=3$ [7]	13
รูปที่ 2.8	แผนภาพสถานะ (State Diagram) ของวงจรเข้ารหัสที่ $\text{rate}=1/2, K=3$ [7]	15
รูปที่ 2.9	แผนภาพต้นไม้ (Tree diagram) ของภาคเข้ารหัสที่ $\text{rate}=1/3, K=3$ [7]	16
รูปที่ 2.10	แผนภาพทรีลิส (Trellis diagram) ของวงจรเข้ารหัสที่ $\text{rate}=1/2, K=3$ [7]	17
รูปที่ 2.11	แผนภาพการวนลูบไปข้างหน้าและไปข้างหลัง	21
รูปที่ 2.12	การวางสลับข้อมูล (ก) Block Interleaving(ข) Random Interleaving	23
รูปที่ 2.13	การรับส่งสัญญาณแบบ MIMO	24
รูปที่ 2.14	โครงสร้างการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้	26
รูปที่ 2.15	สัญญาณที่ได้จากการทำไคเวอร์ซิตี และการรวมสัญญาณที่มาจากแต่ละเส้นทาง	27
รูปที่ 2.16	การวางเสาอากาศในการส่งสัญญาณ 2 เสาให้มีความห่างเป็นระยะ d	29
รูปที่ 2.17	โครงสร้างการทำงานของซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง (Selective Combining)	31
รูปที่ 2.18	โครงสร้างการทำงานของสวิตช์คอมไบนิ่ง (Switched Combining)	32
รูปที่ 2.19	โครงสร้างการทำงานของแมกซ์ิมัลเรโซคอมไบนิ่ง (Maximal Combining, MCR)	33
รูปที่ 2.20	สถาปัตยกรรม VLST	34
รูปที่ 2.21	สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรเข้ารหัสหนึ่งตัว	35
รูปที่ 2.22	สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรเข้ารหัสในแต่ละชั้นสัญญาณ	36
รูปที่ 2.23	สถาปัตยกรรม DLST หรือ TLST	36
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของเครื่องส่งที่มีการเข้ารหัสเลเซอร์สเปซไทม์	42
รูปที่ 3.2	โครงสร้างของเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้	44
รูปที่ 3.3	โครงสร้างของเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้ในเชิงความถี่	45
รูปที่ 4.1	กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบระหว่างจำนวนเสาอากาศที่แตกต่าง	53

กันในเครื่องรับเชิงของเวลา (Time Domain Receiver)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

- รูปที่ 4.2** กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบระหว่างจำนวนเสาอากาศที่แตกต่างกัน 54
ในเชิงของความถี่ (Frequency Domain Receiver)
- รูปที่ 4.3** กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิง 56
ของเวลา (Time Domain Adaptive Iterative Receiver) โดยมีเสาอากาศจำนวน 2×2
- รูปที่ 4.4** กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิง 57
ความถี่ (Frequency Domain Adaptive Iterative Receiver) โดยมีสายอากาศจำนวน 2×2
- รูปที่ 4.5** กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิง 58
ของเวลา (Time Domain Adaptive Iterative) โดยมีสายอากาศจำนวน 3×3
- รูปที่ 4.6** กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับวนซ้ำปรับค่าได้เชิงของ 60
เวลากับเชิงความถี่ โดยมีสายอากาศจำนวน 2×2

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบความซับซ้อนระหว่างวงจรกรองแบบปรับค่าได้ในเชิงของเวลา
และวงจรกรองแบบปรับค่าได้ในเชิงความถี่

51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการสื่อสารแบบไร้สายได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก รูปแบบการสื่อสารจึงถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง แต่ยังมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้าน เช่น ความจุของช่องสัญญาณ สัญญาณรบกวน อันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ เป็นต้น เนื่องจากการสื่อสารส่วนใหญ่ นิยมใช้ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (Multiple-Input Multiple-Output; MIMO) เพื่อเพิ่มความจุให้กับระบบและเป็นระบบที่มีการใช้เสาอากาศหลายตัวในการรับส่งข้อมูล ทำให้มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น คือมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเสาอากาศอื่นที่ใช้ในการส่งด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก จึงถูกจำกัดด้วยสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (Co-channel interference; CCI) อันเนื่องมาจากสัญญาณเสาอากาศข้างเคียง

เพื่อที่จะทำให้ระบบดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นเราจึงต้องพัฒนาทางด้านภาครับที่สามารถกรองสัญญาณได้ดีขึ้น เพื่อจำกัดสัญญาณรบกวนจากช่องทางสัญญาณร่วม (CCI) และลดความซับซ้อนของระบบที่เกิดขึ้นให้มีค่าที่ต่ำลง ทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือการทำให้เครื่องรับสัญญาณสามารถวนซ้ำแบบปรับค่าได้ในเชิงความถี่ (Frequency domain adaptive iterative Receiver) โดยการปรับค่านี้อาจเป็นการนำข้อมูลของเสาอากาศอื่นที่ไม่ใช่เสาอากาศที่เรา กำลังพิจารณา มาปรับค่าเพื่อกรองสัญญาณรบกวนและทำให้ความซับซ้อนของระบบมีค่าน้อยลง

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบภาครับที่สามารถปรับค่าได้ดังที่กล่าวมาทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) เพื่อแสดงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการลดลงของสัญญาณรบกวน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ในการประยุกต์ใช้สำหรับการสื่อสารยุคที่ 4
- 2) เพื่อศึกษาเทคนิคและวิธีการที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้การสื่อสารแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก

3) เพื่อออกแบบภาครับของการสื่อสารระบบสัญญาณเข้าและหลายสัญญาณออกปลายทางแบบมีการป้อนข้อมูลวนซ้ำแบบปรับค่าได้เชิงความถี่ (Frequency domain adaptive iterative Receiver) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นและลดความซับซ้อนของระบบ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ระบบสามารถรองรับการรับ-ส่งสัญญาณที่เสาอากาศหลายตัวได้
- 2) ภาครับจะต้องนำข้อมูลของสายอากาศอื่น มาใช้ในการวนซ้ำปรับค่าเชิงความถี่ เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีค่าความผิดพลาดที่น้อยลง และลดความซับซ้อนการทำงานของระบบ
- 3) แสดงผลของการทดลอง โดยทำการจำลองระบบจากโปรแกรมแมทแล็บ (Matlab)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบ MIMO และปัญหาที่เกิดขึ้น
- 2) ศึกษาการออกแบบและการทำงานของภาคส่งสัญญาณและภาครับแบบวนซ้ำปรับค่าได้
- 3) ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้เชิงความถี่
- 4) ศึกษาการใช้งานโปรแกรมแมทแล็บเพื่อทำการจำลองรูปแบบของสัญญาณ
- 5) ทดลองออกแบบเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้สำหรับสัญญาณ จากนั้นทำการจำลอง (Simulate) การรับส่งสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น
- 6) ทดลองออกแบบเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าเชิงความถี่ได้สำหรับสัญญาณ จากนั้นทำการจำลอง (Simulate) การรับส่งสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น
- 7) นำผลที่ได้จากการจำลอง (Simulate) มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่ากับเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าเชิงความถี่ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดอัตราการผิดพลาดของข้อมูลและลดความซับซ้อนของระบบมากน้อยเพียงไร

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการสื่อสารในยุคต่าง ๆ

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เครือข่ายโทรศัพท์ที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากยุคแรก (1G) ที่ให้บริการในระบบอะนาล็อกจนมาถึงยุคปัจจุบันซึ่งให้บริการในระบบดิจิทัล (2G-2.75G) และเข้าสู่ยุค 3G ซึ่งเน้นในเรื่องของการให้บริการด้านมัลติมีเดีย โดยสามารถที่จะพิจารณาพัฒนาการของแต่ละยุคได้ดังนี้

2.1.1 การสื่อสารในยุคที่ 1G

เป็นยุคแรก (First Generation) เป็นยุคแรกของการพัฒนาระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ การรับส่งสัญญาณใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณอะนาล็อกเข้าช่องสื่อสาร โดยมีการเพิ่มเทคโนโลยี FDMA (Frequency Division Multiple Access) เข้าไป ซึ่งก็จะทำให้สามารถเปลี่ยนการส่งสัญญาณอะนาล็อกเดิมไปเป็นดิจิทัลได้ และยังสามารถแบ่งคลื่นความถี่ออกเป็น 30 ช่องทาง เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลอื่นๆ ที่ไม่ใช่เสียงออกไปได้นั่นเอง ด้วยวิธีการนี้มีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนช่องสัญญาณ ทำให้การใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ และยังคงติดขัดเรื่องการขยายแถบความถี่

2.1.2 การสื่อสารในยุคที่ 2G

เป็นยุคที่สอง (Second Generation) ที่มีการพัฒนาต่อจากยุคแรกด้วยการเข้ารหัสสัญญาณเสียง และทำการบีบอัดสัญญาณเสียงในรูปแบบดิจิทัลให้มีขนาดข้อมูลที่น้อยลง เหลือเพียงประมาณ 9 กิโลบิตต่อวินาที ต่อช่องสัญญาณ การติดต่อจากสถานีลูก จะใช้วิธี TDMA (Time Division Multiple Access) แบ่งช่วงเวลาออกเป็นช่องเล็ก ๆ และแบ่งกันใช้ ทำให้ใช้ช่องสัญญาณความถี่วิทยุได้เพิ่มขึ้นจากเดิมอีกมาก กับอีกแบบหนึ่งเป็นการแบ่งการเข้าถึงตามการเข้ารหัส และการถอดรหัส โดยใส่แอดเดรสเหมือน IP เราเรียกวิธีการนี้ว่า CDMA - Code Division Multiple Access ในยุค 2G จึงเป็นการรับส่งสัญญาณโทรศัพท์แบบดิจิทัลหมดแล้ว

2.1.3 การสื่อสารในยุคที่ 2.5 G

เป็นยุคที่มีการเน้นเรื่องของการรับส่งข้อมูลผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องมาจากว่าระบบในยุค 2G นั้นไม่สามารถให้บริการในเรื่องการรับ-ส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไม่ได้ถูกออกแบบมาให้สนับสนุนในเรื่องดังกล่าวโดยเฉพาะ ดังนั้นเครือข่ายในยุค 2.5G จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับส่งข้อมูลของลูกค้า โดยมีการ Upgrade จากเครือข่ายยุค 2G เดิม ซึ่งเครือข่ายในยุค 2.5G นี้ก็คือ เครือข่าย CDMA 2000 1X, เครือข่าย GPRS (General Packet Radio Service) และ Upgrade เพิ่มเติมกลายเป็นเครือข่าย EDGE (Enhanced Data rate for GSM Evolution) ซึ่งเป็นเครือข่ายในยุค 2.5G และยุค 2.75G นี้จะให้การรับส่งข้อมูลเป็น Packet

2.1.4 การสื่อสารในยุคที่ 3G

การสื่อสารในยุคที่ 3 (Third Generation) เป็นเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้นของลูกค้า ซึ่งถึงแม้ว่าเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุค 2.5G จะสามารถให้บริการแก่ลูกค้าในเรื่องของรับส่งข้อมูลได้แล้วนั้น แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูล ดังนั้นระบบ 3G จึงได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าในเรื่องการรับ-ส่งข้อมูลที่หลากหลายขึ้นและรวดเร็วขึ้น และด้วยความสามารถของเครือข่ายในยุค 3G นี้เอง ทำให้การใช้บริการด้านเสียง (Voice Call) นั้นสามารถใช้งานได้บนเครือข่ายของการรับส่งข้อมูล (Data Call) ซึ่งเรียกการทำงาน ลักษณะ ดังกล่าว ว่า VOP (Voice Over Packet) โดยเครือข่ายในยุค 3G นี้ประกอบด้วย เครือข่าย W-CDMA (Wideband CDMA), เครือข่าย CDMA2000 1x EV-DO และ เครือข่าย CDMA2000 1x EV-DV

จากข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นว่าในการสื่อสารนั้นมีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา ทำให้การสื่อสารในยุคสมัยนี้มีการพัฒนาที่รวดเร็ว ตอบสนองความต้องการการใช้งานได้มากยิ่งขึ้น ความสะดวกสบายในการสื่อสารก็มากขึ้นเช่นกัน และในตอนนี้ก็มีการพัฒนาการสื่อสารไปสู่ยุคสมัยหนึ่ง ก็คือจะเริ่มพัฒนาเข้าสู่ยุค 4G

2.1.5 การสื่อสารในยุคที่ 4G

4G มาจากคำเต็มว่า ระบบสื่อสารไร้สายยุคที่ 4 Fourth Generation เทคโนโลยีไร้สายยุคที่ 4 ที่มุ่งเน้นการรับ-ส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง ถึงระดับ 100 Mbps และสามารถประยุกต์ใช้ในด้านมัลติมีเดียได้กว้างขวางขึ้น ซึ่งความเร็วที่เร็วกว่ายุคของ 3G มาก 4G ถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานบนเครือข่าย ที่กินพื้นที่กว้างก็ได้หรือจะทำ เป็นเครือข่ายขนาดเล็กๆ แบบ WLAN ได้อีกด้วย

สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) เป็นองค์กรหนึ่ง ที่พยายามผลักดันอย่างมากในเรื่องมาตรฐานเทคโนโลยีโทรคมนาคม ได้ให้ความสนใจกับเทคโนโลยี 4G เช่นเดียวกัน และตั้งเป้าหมายการพัฒนาไว้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทคโนโลยีของระบบ 4G ควรจะเข้ากันได้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันซึ่งมีระบบการเข้าถึงที่ค่อนข้างหลากหลาย และใช้ได้กับเครือข่ายสื่อสารส่วนบุคคล (PAN)
- อัตราการรับ-ส่งข้อมูลควรทำได้ 100 Mbps สำหรับการใช้งานลักษณะเคลื่อนที่ และในปี ค.ศ. 2010 ควรทำได้อย่างน้อย 1 Gbps สำหรับการใช้งานทั่วไป
- เป็นมาตรฐานสากล แบบเปิด ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับสเปคตรัมที่ใช้กันแพร่หลายทั่วโลกในขณะนี้

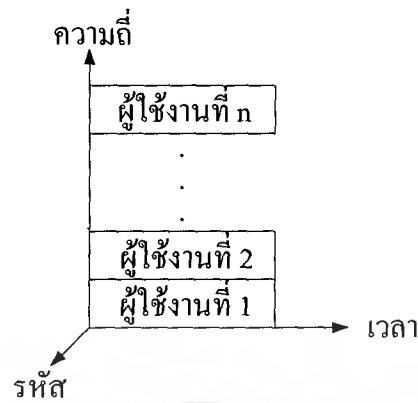
ในขณะที่มุมมองของ WWRF (Wireless World Research Forum) คาดหมายว่า เครือข่าย 4G ควรจะเป็นเครือข่ายที่สามารถทำงานบนเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต ร่วมกับเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้งานอื่นๆ เช่น WiFi และ WiMAX โดยมีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลตั้งแต่ 100 Mbps (สำหรับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั่วไป) จนถึง 1 Gbps (สำหรับเครือข่าย WiFi ท้องถิ่น) ที่สำคัญคือ ยังมีอีกกลุ่มหนึ่งทางด้านหน่วยงาน ที่มีหน้าที่จัดทำมาตรฐาน และนักสังเกตการณ์อุตสาหกรรมว่า WiMAX น่าจะมีโอกาสแปลงกลายเป็นเทคโนโลยี 4G ที่มีความสมบูรณ์มากกว่าเทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย 4G ที่พยายามพัฒนากันใหม่ขณะนี้

2.2 เทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทาง (Multiple Access Technique)

ระบบการสื่อสารสามารถแบ่งออกเป็นระบบอนาล็อก (Analog) และระบบดิจิทัล (Digital) ในส่วนของระบบอนาล็อกนั้นจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับความจุของช่องสัญญาณไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาระบบ สื่อสารดิจิทัลเพื่อเพิ่มความจุของช่องสัญญาณ โดยสามารถที่จะแบ่งวิธีการเข้าถึงระบบเครือข่ายช่องสัญญาณ ได้ดังนี้

2.2.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access; FDMA)

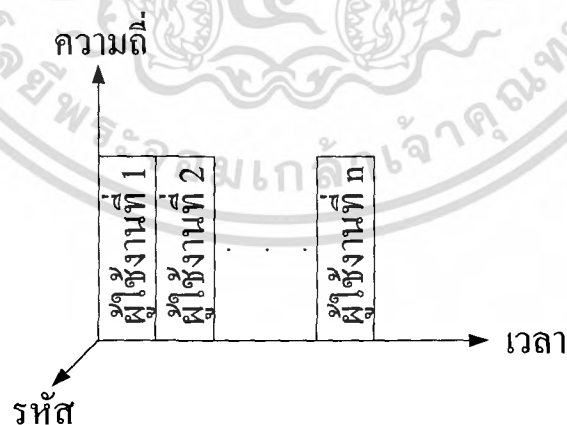
ระบบ FDMA เป็นระบบการเข้าใช้ช่องสัญญาณกันคนละความถี่ใช้ในระบบอนาล็อกเป็นเทคนิคการเข้าถึงที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากง่ายแก่การจัดการเพียงแต่จัดสรรความถี่ให้แก่แต่ละแห่งหรือแต่ละช่องสัญญาณให้เลือกใช้โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเวลาส่งหรือเวลาหน่วงจากการส่งสัญญาณที่ระยะทางต่างกัน เพราะการใช้คนละความถี่สามารถส่งพร้อมกันได้โดยไม่รบกวนกันจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเวลาในการส่ง แต่การจัดการโดยการแบ่งความถี่นี้จะทำให้ได้ช่อง สัญญาณที่จำกัดการเพิ่มช่องสัญญาณจำเป็นต้องเพิ่มความถี่หรือลดขนาดช่องสัญญาณลงนิยมใช้งานในระบบวิทยุสื่อสารและดาวเทียม รูปที่ 2.1 แสดงแนวคิดแบบ FDMA



รูปที่ 2.1 แนวคิดแบบ FDMA

2.2.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access; TDMA)

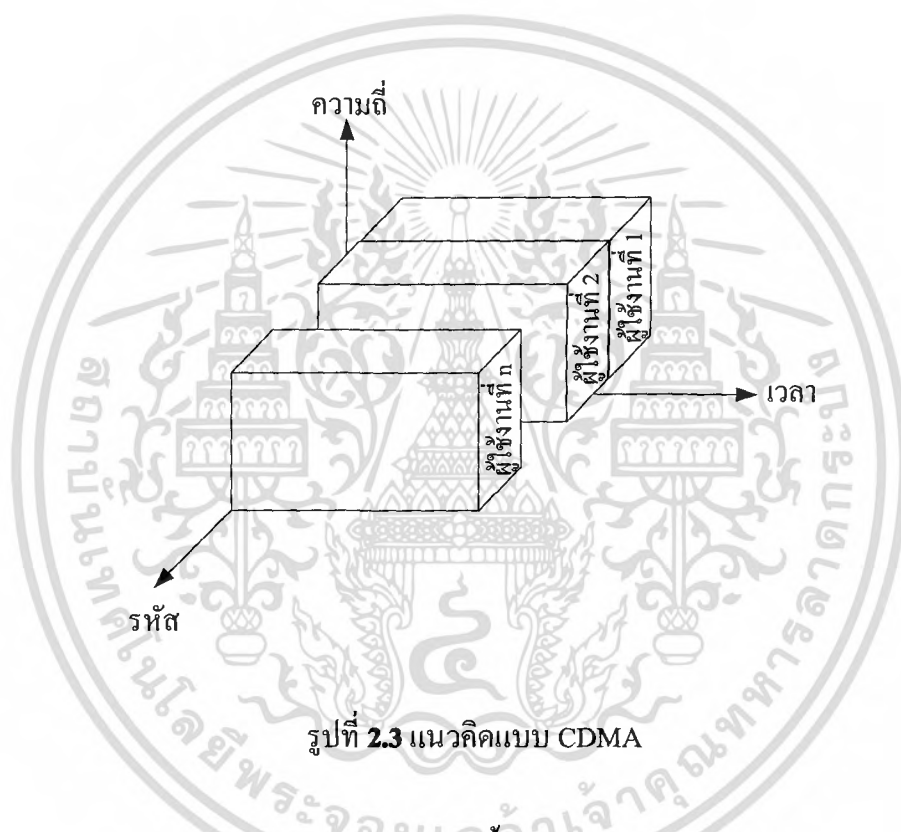
ระบบ TDMA เป็นระบบการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบดิจิทัลที่อนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถใช้ความถี่เดียวกันในการสื่อสาร โดยการแบ่งช่วงเวลาในการใช้งานสลับกันไป ผู้ใช้แต่ละรายจะถูกกำหนดเวลาไว้ตามช่องเวลา (Time slot) โดยผู้ใช้แต่ละรายจะสามารถรับหรือส่งข้อมูลได้เฉพาะช่วงเวลาที่ได้รับสิทธิเท่านั้น เทคนิคนี้นิยมใช้งานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งทำให้เพิ่มช่องสัญญาณได้โดยไม่ต้องเพิ่มความถี่ในการใช้งาน ทำให้ระบบโทรศัพท์ที่มีจำนวนคู่สายที่จะสนทนาพร้อมกันมากขึ้น รูปที่ 2.2 แสดงแนวคิดแบบ TDMA



รูปที่ 2.2 แนวคิดแบบ TDMA

2.2.3 การเข้าถึงหลายทางแบบการแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access; CDMA)

ระบบ CDMA เป็นระบบการเข้าใช้ช่องสัญญาณ โดยที่ผู้ใช้งานสามารถใช้งานความถี่พร้อมกันเวลาเดียวกันได้ โดยการเข้ารหัส (Coding) ผู้ใช้งานจะมีรหัสที่แตกต่างกันไป การเข้าถึงแบบนี้จะทำให้เพิ่มช่องสัญญาณได้มากกว่าแบบ FDMA และ TDMA ในช่วงความถี่ที่เท่ากันนอกจากนี้ยังทำให้การส่งสัญญาณมีความปลอดภัยสูงขึ้นเพราะมิได้มีการเข้ารหัสสัญญาณก่อนทำการส่ง รูปที่ 2.3 แสดงแนวคิดแบบ CDMA



การเข้าถึงข้อมูลหลายทางโดยใช้การแบ่งรหัสนั้น คุณสมบัติของการเข้าถึงหลายทางสามารถทำได้โดยการเข้ารหัสซึ่งผู้ใช้แต่ละคนจะถูกกำหนดลำดับรหัส (Code Sequence) ให้เครื่องรับที่รู้ลำดับรหัสของผู้ใช้แต่ละคนเท่านั้นจึงจะสามารถรับสัญญาณและทำการถอดรหัสเพื่อ ให้ได้ข้อมูลเดิมกลับมา เนื่องจากแบนวิดท์ (Bandwidth) ของสัญญาณจะมีค่ามากกว่าแบนวิดท์ของสัญญาณข้อมูลมาก ทำให้กระบวนการเข้ารหัสนั้นมีผลทำให้เกิดการแผ่กว้างของสเปกตรัมของสัญญาณเรียกว่า การมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ (Spread-Spectrum Modulation : SS Modulation) เมื่อสัญญาณข้อมูลมีการแผ่กว้างออกไปตลอดช่วงของแบนวิดท์ของสัญญาณสเปกตรัมแผ่ เป็นผลทำให้สัญญาณสเปกตรัมเกิดความหนาแน่น (Density) ของกำลังงานลดลง อัตราส่วนของความกว้างแถบของ

สัญญาณสเปกตรัมแผ่ต่อความกว้างแถบของสัญญาณข้อมูลจะถูกเรียกว่าอัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain : G_p) ของระบบสเปกตรัมแผ่

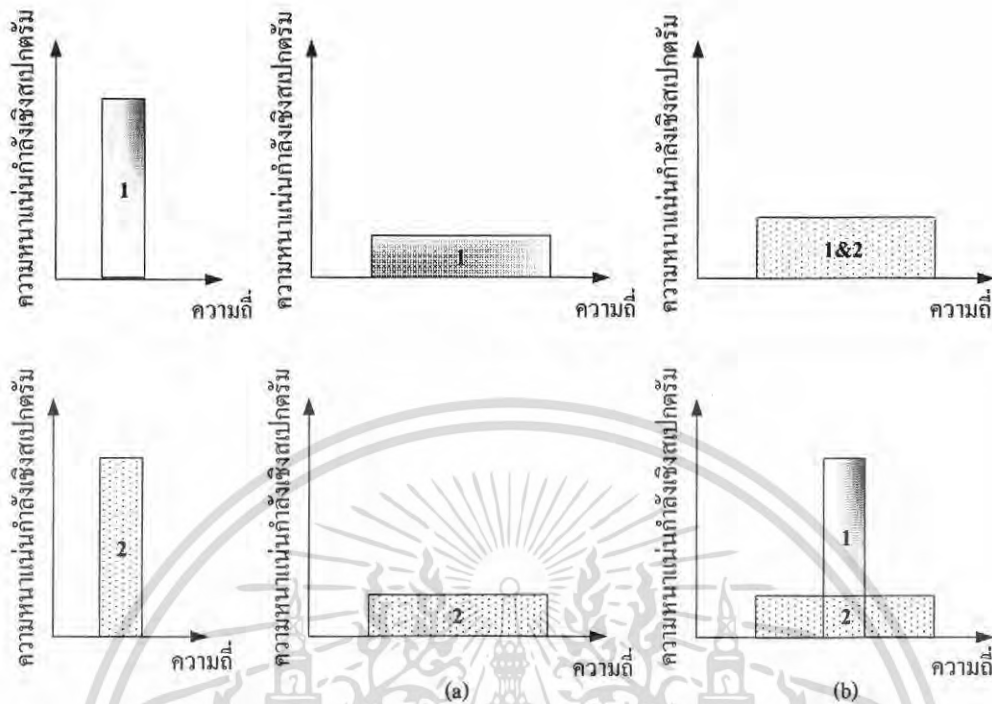
$$G_p = \frac{B_t}{B_i} \quad (2.1)$$

เมื่อ B_t = แบนวิดท์ของการส่งสัญญาณ

B_i = แบนวิดท์ของสัญญาณข้อมูล

ก่อนการเข้ารหัส ที่เครื่องรับจะเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณรหัส เพื่อให้ได้ข้อมูลเดิมก่อนการเข้ารหัสออกมา นั่นคือเครื่องรับจะต้องรู้รหัสที่ใช้ในการมอดูเลตก่อน คุณสมบัติที่สำคัญของการใช้เทคนิคสเปกตรัมแผ่มีดังนี้

1.) ความสามารถในการเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access Capability) หากเกิดเหตุการณ์ที่มีผู้ใช้งานหลายคนส่งสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณสเปกตรัมแผ่ในเวลาเดียวกันนั้น เครื่องรับจะยังสามารถแยกความแตกต่างของผู้ใช้งานแต่ละรายได้โดยแบ่งแยกจากรหัสของผู้ใช้แต่ละราย ซึ่งมีการกำหนดค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-Correlation) ระหว่างรหัส ข้อมูลของผู้ใช้ที่ต้องการเท่านั้นที่จะถูกดีสเปรด (Despread) ในขณะที่สัญญาณสเปกตรัมแผ่จากผู้ใช้อื่นๆ จะยังคงมีลักษณะของสเปกตรัมที่แผ่กว้างดั้งเดิม เหตุนี้ภายในความกว้างแถบของช่องสัญญาณจะมีกำลังของสัญญาณจากผู้ใช้ที่ต้องการดีเทค (Detect) มากกว่ากำลังของสัญญาณแทรกสอด (Interfering Power) จากผู้ใช้อื่นๆ มาก ดังนั้นจึงสามารถทำการดีเทคสัญญาณที่ต้องการออกมาได้ แสดงดังรูปที่ 2.4 ในรูปที่ 2.4(a) แสดงการสร้างสัญญาณสเปกตรัมแผ่ของผู้ใช้ 2 คนจากสัญญาณข้อมูลเดิมที่เป็นสัญญาณแบนด์แคบ ส่วนรูปที่ 2.4(b) แสดงการส่งสัญญาณสเปกตรัมแผ่ของผู้ใช้ทั้ง 2 คนในเวลาเดียวกัน ที่เครื่องรับจะมีเพียงสัญญาณของผู้ใช้คนที่ 1 เท่านั้นที่ถูกดีสเปรดและได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมา



รูปที่ 2.4 หลักการเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่

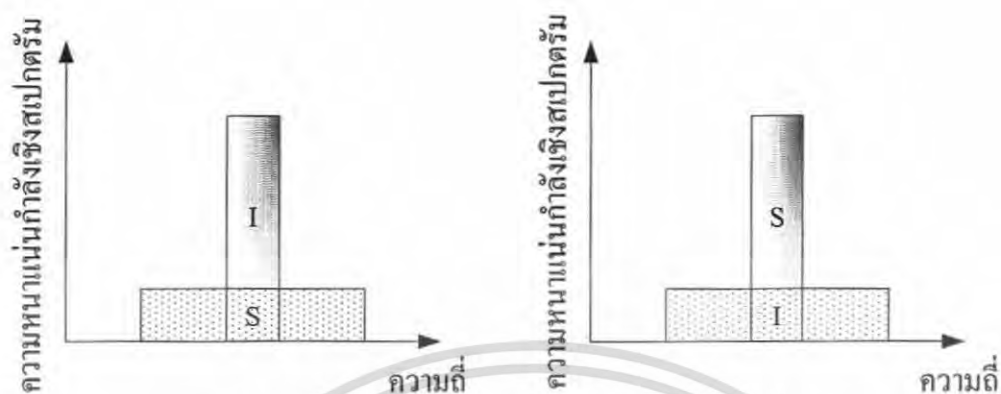
2.) การป้องกันการแทรกสอดแบบหลายเส้นทาง (Multiple Interference) สำหรับช่องสัญญาณวิทยุเส้นทางเดินของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับไม่ได้มีเพียงเส้นทางเดียว เนื่องจากการสะท้อน และการหักเห ทำให้สัญญาณที่มาถึงภาครับนั้นมีความแตกต่างกันทางแอมพลิจูด (Amplitude) และเฟส (Phase) การรวมสัญญาณดังกล่าวนั้นอาจจะเป็นการรวมแบบเสริมกันที่บางความถี่และเป็นการรวมแบบหักล้างกันที่ความถี่อื่นๆ เหตุการณ์ดังกล่าวเป็นผลทำให้เกิดสัญญาณที่ถูกกระจายออก (Dispersed Signal) ทางเวลา การแก้ปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณแทรกสอดแบบหลายเส้นทางทำได้โดยการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ แต่อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาขึ้นอยู่กับชนิดของการมอดูเลตที่ใช้ด้วย

3.) ความเป็นส่วนตัว (Privacy) เมื่อสัญญาณถูกส่งออกไปสามารถจะถูกดักตีสปเรคและได้สัญญาณข้อมูลเดิมกลับคืนมาเมื่อเครื่องรับรู้รหัสเท่านั้น

4.) การกำจัดสัญญาณแทรกสอด (Interference Rejection) การทำสหสัมพันธ์ข้ามสัญญาณด้วยสัญญาณแบนด์แคบ (Narrowband) จะทำให้กำลังนั้นถูกแผ่ออก เป็นการลดกำลังงานของสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ในแบนวิทซ์ของสัญญาณข้อมูลลง แสดงดังรูปที่ 2.5 สัญญาณสเปกตรัมแผ่ (S) ซึ่งถูกรบกวนจากสัญญาณแทรกสอดแบนด์แคบ (I) จะถูกตีสปเรคที่เครื่องรับ ในขณะที่สัญญาณแทรกสอดจะถูกแผ่กว้างทางสเปกตรัม ทำให้สัญญาณแทรกสอดดังกล่าวปรากฏเป็นสัญญาณรบกวนพื้น

หลัง (Background noise) เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ถูกตีสปเรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การขจัดสัญญาณแทรกสอด ชูคสอง

5.) ความสามารถในการป้องกันการแทรกแซงจากบุคคลอื่น (Anti-Jamming Capability) โดยเฉพาะการแทรกแซงแบนด์แคบ (Narrowband Jamming) คุณสมบัตินี้คล้ายกับการกำจัดสัญญาณแทรกสอดเพียงแต่สัญญาณที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปโดยเจตนาให้เกิดขึ้นแก่ระบบ

6.) ความน่าจะเป็นในการถูกดักจับสัญญาณต่ำ (Low Probability of Intercept : LPI) เนื่องจากสัญญาณสเปกตรัมแผ่มีความหนาแน่นของกำลังงานต่ำจึงทำให้ยากที่จะถูกดักจับ

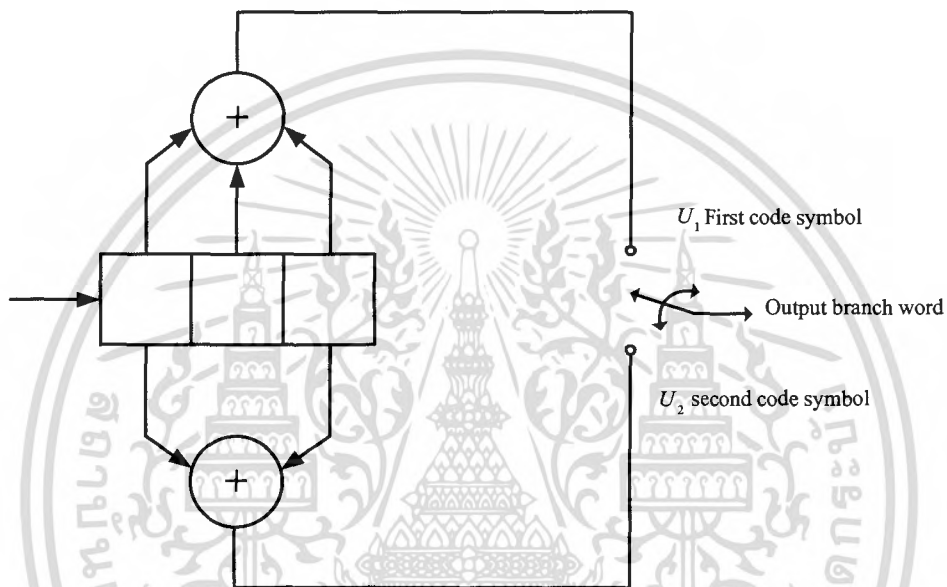
2.3 รหัสคอนโวลูชัน (Convolutional Code)

การเข้ารหัสคอนโวลูชันนั้น ถูกค้นพบโดย Elias ในปี พ.ศ.2498 โดยจะเป็นการเข้ารหัสที่ถูกออกแบบสำหรับใช้งานในระบบสื่อสารที่มีการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง การเข้ารหัสคอนโวลูชันเป็นการเข้ารหัสที่มีการนำข้อมูลในอดีตจำนวนหนึ่งที่ถูกป้อนเข้ามาภายในวงจรมาทำการประมวลผลร่วมกับข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้นๆ ในการคำนวณหาการรหัสของข้อมูลชุดนั้น

โดยทั่วไปของตัวเข้ารหัสคอนโวลูชันจะมี Shift Register k ตัว (K-Stage Shift Register) เพื่อเลื่อนบิตของข้อมูลข่าวสารสำหรับการเข้ารหัสและมีตัววงจรบวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) จำนวน n ตัว เพื่อทำการเข้ารหัสโดยที่ m คือค่า Constraint Length เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวน Shift Register ทั้งหมดโดยเอาที่พู่ที่ออกมาจะได้ตามจำนวนของวงจรบวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) จะได้จำนวนข้อมูลข่าวสารที่เข้ารหัสต่อจำนวนข้อมูลคำรหัส (Code Rate) เท่ากับ k/n เมื่อ $k < n$

รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าที่ค่า Constraint Length เท่ากับ 3 และ n เท่ากับ 2 ดังนั้น Code Rate เท่ากับ $1/2$ ซึ่งจำนวนบิตของข้อมูลข่าวสารจะวิ่งเข้าไปใน Shift Register จากซ้ายไปขวาแล้ว ตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) จะเป็นตัวเข้ารหัสโดยสลับเอาที่พู่ทที่ออกมาได้เป็นสองทางจะเห็นว่าตัววงจรวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของรหัสเนื่องจากถ้ามีการเปลี่ยนการเชื่อมต่อระหว่าง Adder กับ Shift Register จะทำให้เกิดรหัสที่ต่างกัน จากรูปแสดงให้เห็นว่าข้อมูลข่าวสารเวกเตอร์ $m = "1 0 1"$ เมื่อทำการเข้ารหัสจะเห็นว่าข้อมูลข่าวสารสามบิต เข้าตัวเข้ารหัส (Encoder) ที่เวลา t_1, t_2, t_3



รูปที่ 2.6 วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่ $rate=1/2, K=3$ [7]

รูปที่ 2.6 เมื่อข้อมูลข่าวสารเข้าไปในตัวเข้ารหัสจนครบจะมีการใส่บิต "0" เข้าไปในตัวเข้ารหัสเพื่อเคลียร์บิตในตัวเข้ารหัสเพื่อกลับไปอยู่ในสถานะ (State) เริ่มต้นที่เวลา t_4, t_5, t_6 จะได้ข้อมูลคำรหัสที่สมบูรณ์ดังนี้ "1 0 0 0 1 1 1 1 1 0" ซึ่งการเขียนรูปแบบของภาคเข้ารหัสจะระบุเป็นเซตของ n Connection Vector และ n Modulo-2 Adder โดยเวกเตอร์มีมิติเท่ากับ K จากนั้นก็ให้ค่าบิต "1" แสดงตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่าง Shift Register กับวงจรวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) และ บิต "0" กับตำแหน่งที่ไม่ได้มีการเชื่อมต่อกันระหว่าง Shift Register กับวงจรวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) ดังนั้นจะได้ Connection Vector g_1 สำหรับการเชื่อมต่อด้านบน และ g_2 สำหรับการเชื่อมต่อด้านล่างดังนี้

$$g_1 = [001]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g = [002]_2$$

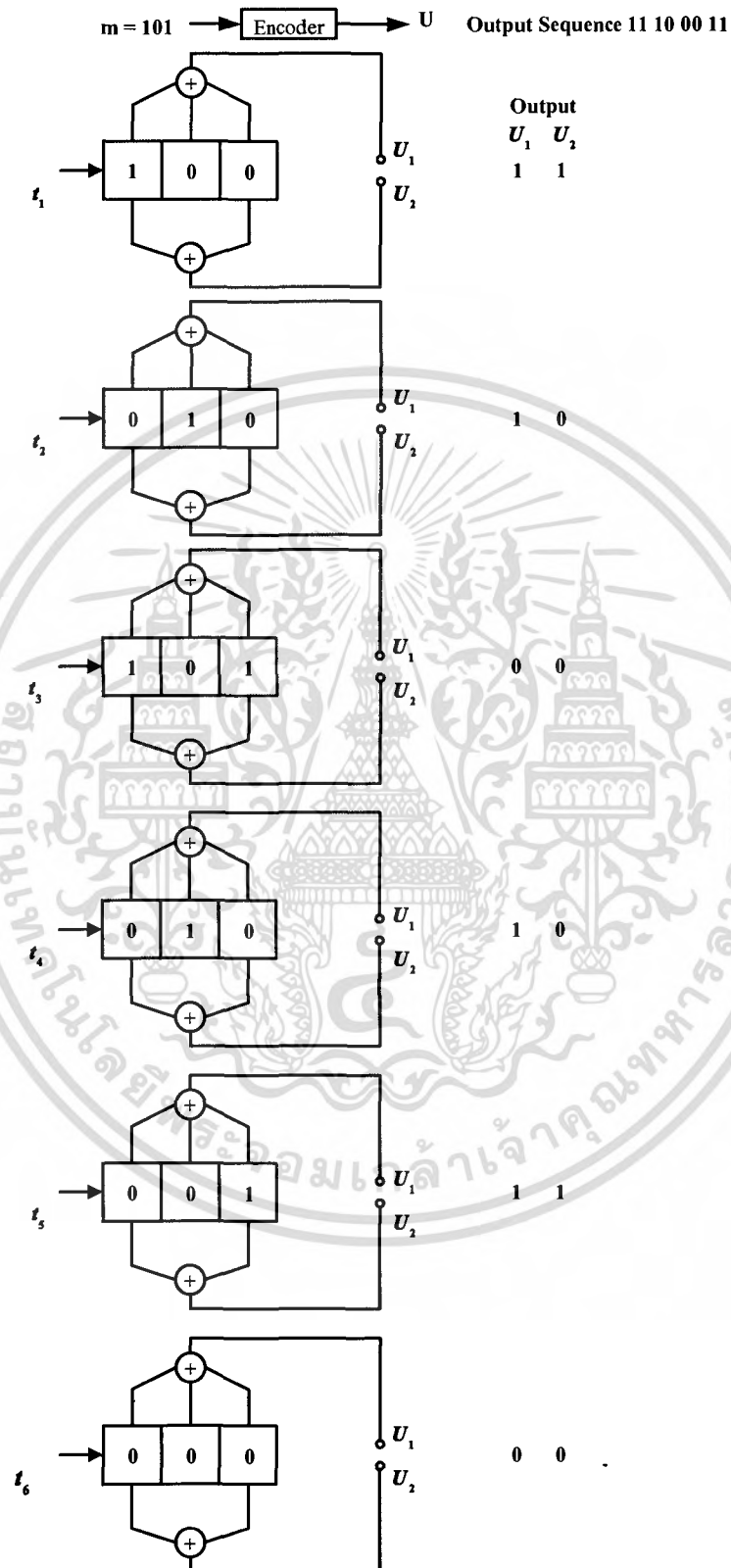
ซึ่งบางครั้งอาจใช้พหุนาม (Polynomial) ในการแสดงภาคเข้ารหัสโดยให้ดีกรีสูงสุดของพหุนามเท่ากับ $k=1$ และแทนสัมประสิทธิ์เป็น “1” เมื่อ Shift Register กับตัววงจรบวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) ต่อเข้าด้วยกัน และ “0” เมื่อ Shift Register กับตัววงจรบวกแบบมอดุโล 2 (Modulo-2 Adder) ไม่ได้ต่อกันจากรูปที่ 2.7 เขียน $g_1(x)$ แทนการเชื่อมต่อด้านบนและ $g_2(x)$ แทนการเชื่อมต่อด้านล่างดังนี้

$$g_1(x) = 1 + x$$

$$g_2(x) = 1 + x + x^2$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



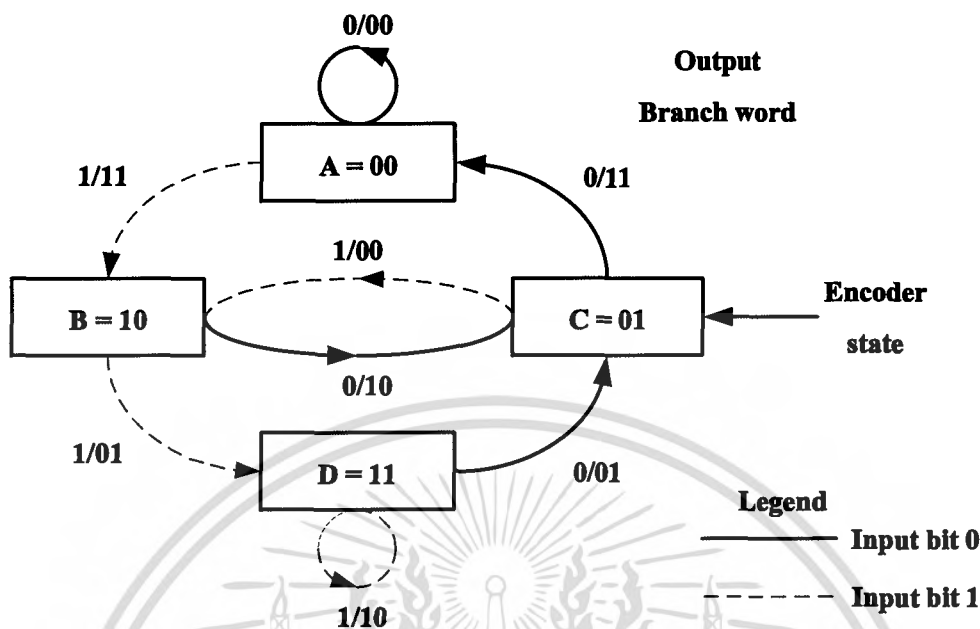
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างขั้นตอนเข้ารหัสของข้อมูล 101 ของวงจรเข้ารหัสที่ $rate=1/2, K=3$ [7]
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 วิธีการทำงานของวงจรเข้ารหัสคอนโทรล

ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเข้ารหัสแบบคอนโทรลนั้นจะแสดงลักษณะและวิธีการทำงานของวงจรเข้ารหัส โดยใช้รูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในวงจรเข้ารหัสข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น และค่าของคีย์ที่จะถูกส่งออกไปเมื่อมีข้อมูลในกรณีต่างๆ ที่ป้อนเข้ามา ซึ่งรูปแบบของภาพที่ใช้แสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสนั้นได้แก่ แผนภาพสถานะ (State Diagram) แผนภาพต้นไม้ (Tree Diagram) และแผนภาพทรีลิส (Trellis Diagram) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1.1 แผนภาพสถานะ (State Diagram)

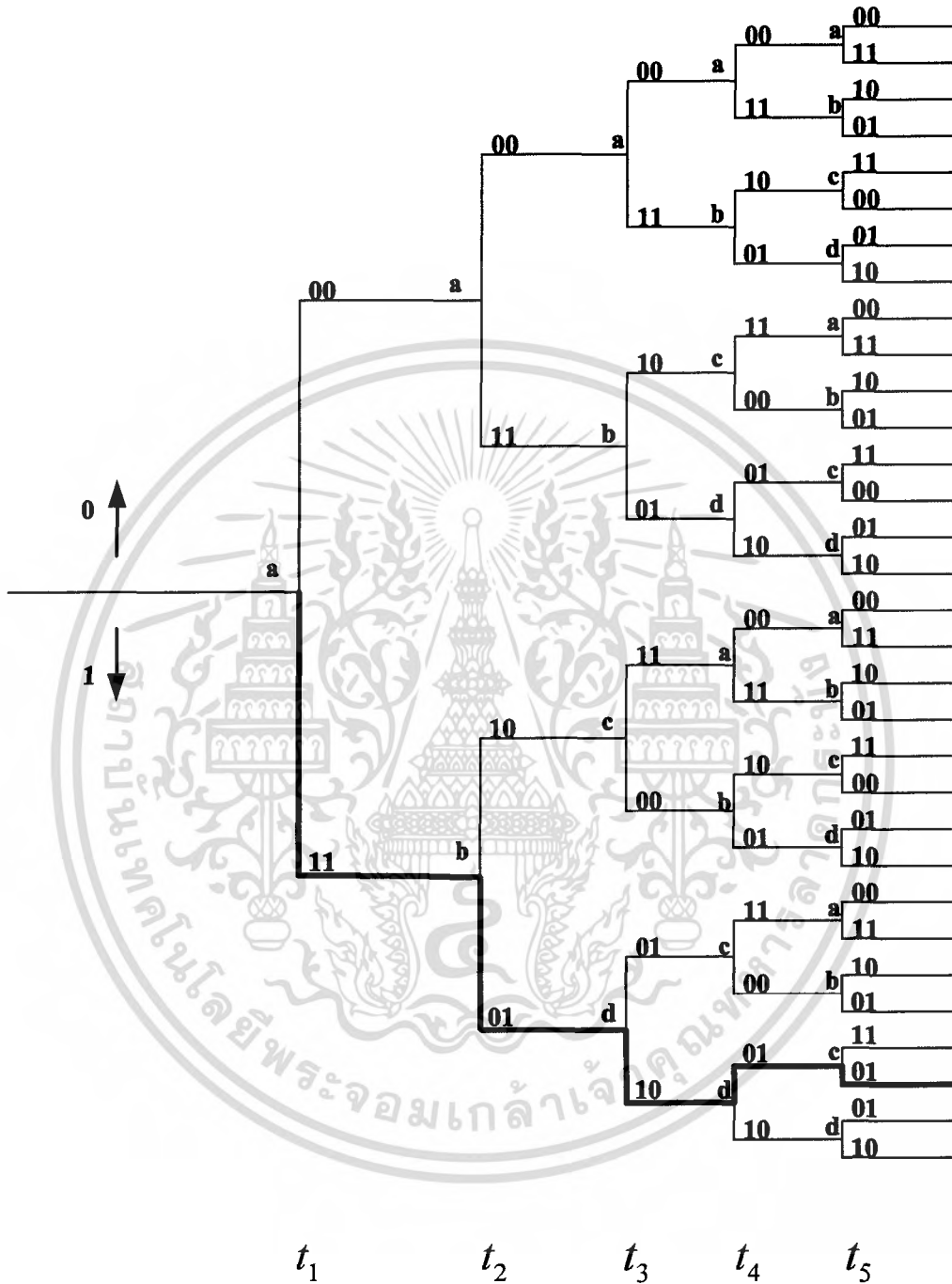
สำหรับการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูลแบบคอนโทรล โดยใช้แผนภาพสถานะนั้นจะเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในวงจรเข้ารหัส ข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้นๆ และผลลัพธ์ที่ได้หลังจากมีการป้อนข้อมูลรูปแบบต่างๆ กับวงจร ซึ่งจะมีลักษณะของแผนภาพสถานะดังรูปที่ 2.8 เป็นต้น แผนภาพสถานะของวงจรเข้ารหัสข้อมูลตัวอย่างของรูปที่ 2.6 ซึ่งมีการแสดงข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ถูกเก็บไว้ในวงจรเข้ารหัสเป็นตัวเลขที่อยู่ในสัญลักษณ์วงกลม โดยในกรณีของวงจรตัวอย่างนั้นมีข้อมูลเก็บไว้ในวงจรเท่ากับสองบิต ดังนั้นจำนวนของข้อมูลทั้งหมดที่เป็นไปได้จะมีค่าเท่ากับ 2^2 หรือ 4 สถานะและสำหรับลูกศรที่อยู่ในรูปนั้นจะแสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสถานะของข้อมูลในวงจรเข้ารหัสจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่งเมื่อมีข้อมูลป้อนเข้ามาในวงจร และเลข x/c ที่อยู่เหนือลูกศรนั้นจะแสดงถึงข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา (x) โดยเส้นทึบแทนข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาเป็น “0” เส้นประแทนข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาเป็น “1” และ คีย์ที่ได้หลังจากการทำงาน (c)



รูปที่ 2.8 แผนภาพสถานะ (State Diagram) ของวงจรเข้ารหัสที่ $\text{rate}=1/2$, $K=3$ [7]

2.3.1.2 แผนภาพต้นไม้ (Tree Diagram)

สำหรับแผนภาพต้นไม้ นั้นจะเป็นการพิจารณาถึงลักษณะของการทำงานของวงจรเข้ารหัส ข้อมูลโดยที่จะมีการพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการป้อนข้อมูลต่างๆ เข้าไปในวงจรเข้ารหัส เป็นหลัก ซึ่งในการพิจารณานั้นจะเริ่มต้นจาก ณ ตำแหน่งรากของแผนภาพต้นไม้ ซึ่งจากตัวอย่างจะกำหนดให้มีการเลื่อนตำแหน่งไปด้านบนเมื่อมีการรับบิต “0” เข้ามา และจะเลื่อนลงด้านล่างเมื่อรับบิต “1” เข้ามาซึ่งหลังจากมีการเลื่อนตำแหน่งที่ใช้พิจารณาแล้ว จะมีการพิจารณาถึงข้อมูลที่จะถูกส่งออกไปจากภาคเข้ารหัส ณ เวลานั้นๆ จากข้อมูลที่อยู่เหนือเส้นทางในตำแหน่งที่มีการพิจารณา ซึ่งจากรูปที่ 2.9 จะมีอินพุต “1 1 0 1 1” ซึ่งจะได้เอาต์พุตเป็น “1 0 0 0 1 0 1 0 1 1”



รูปที่ 2.9 แผนภาพต้นไม้ (Tree diagram) ของภาคเข้ารหัสที่ rate=1/3, K=3 [7]

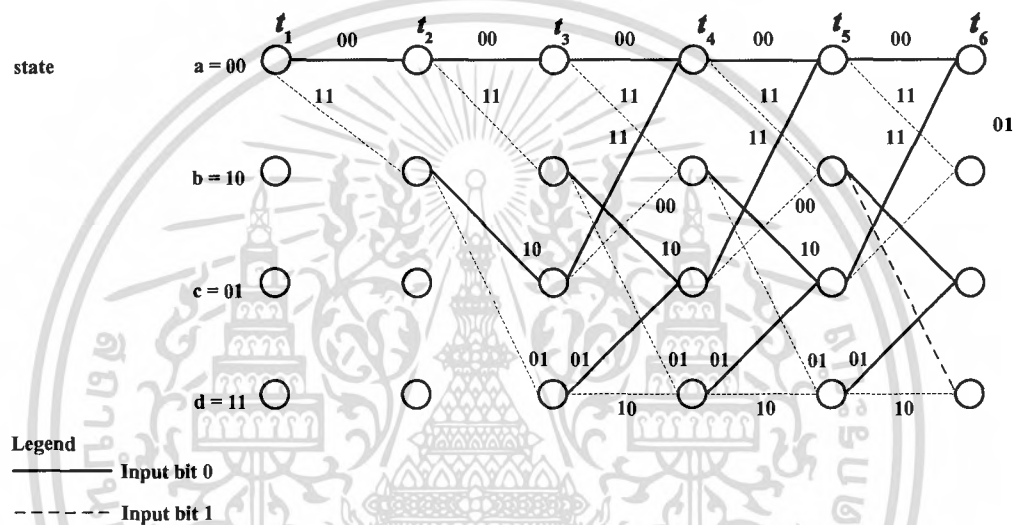
2.3.1.3 แผนภาพตรีติส (Trellis Diagram)

การแสดงผลการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้แผนภาพตรีติสนั้นจะเป็นการแสดงผลการทำงานของวงจรเข้ารหัส โดยใช้แผนภาพสถานะมาทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบให้อยู่ในอีกลักษณะหนึ่งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลต่างๆ ภายในวงจรเข้ารหัสข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และคำรหัสที่ส่งออกไป ณ เวลาต่างๆ โดยที่จะมีลักษณะของแผนภาพทรีลิสดังรูปที่ 2.10 เป็นการแสดงการทำงานของวงจรตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ที่มีการนำข้อมูลในอดีตจำนวนสองบิตมาทำการประมวลผลร่วมกับข้อมูล ณ เวลานั้น (จำนวนสถานะทั้งหมดในแผนภาพทรีลิสจะมีค่าเท่ากับสี่สถานะ) และจะมีข้อมูลป้อนเข้ามาภายในวงจรครั้งละหนึ่งบิต ซึ่งเส้นทางต่างๆ ที่อยู่ภายในแผนภาพทรีลิสนั้นจะแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของวงจรและตัวเลข x/c ที่อยู่เหนือทางเดิน



รูปที่ 2.10 แผนภาพทรีลิส (Trellis diagram) ของวงจรเข้ารหัสที่ $\text{rate}=1/2$, $K=3$ [7]

ในแต่ละเส้นทางนั้นจะแสดงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามา ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลักษณะของแผนภาพทรีลิสแล้วจะพบว่า รูปแบบของแผนภาพทรีลิสในแต่ละสถานะการทำงานนั้นจะมีลักษณะที่คล้ายกันแต่จะมีความแตกต่างกันเฉพาะส่วนหัวและท้าย ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลที่เก็บอยู่ในวงจรนั้นจะมีค่าเริ่มต้นจากสถานะที่ข้อมูลทั้งหมดเป็นศูนย์ และจบลงที่สถานะ 01 ข้อมูลเป็นศูนย์เช่นกัน ดังนั้นเส้นทางอื่นๆ ที่ไม่ผ่านจุดที่มีข้อมูลเป็นศูนย์ทั้งหมด ณ จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายนั้นจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นขนาดของความยาวในแผนภาพทรีลิสนั้นจึงขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ถูกลำนำเข้ามาเข้ารหัส

2.4 อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (MAP Decoding Algorithm)

อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (Maximum a posteriori probability, MAP) อัลกอริทึมที่ใช้เกณฑ์การถอดรหัสที่ลดความน่าจะเป็นของบิตผิดพลาดให้น้อยที่สุด แต่อัลกอริทึม Viterbi นั้นจะลดความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิตที่จะเกิดกับลำดับข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด อัลกอริทึม MAP มีเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบโฆษณาชวนเชื่อ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่า อัลกอริทึม Viterbi และจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับค่าแปรปรวนของสัญญาณรบกวนด้วย อย่างไรก็ตาม MAP จะพิจารณาเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ใน trellis ซึ่งไม่เหมือนกับอัลกอริทึม Soft output Viterbi (SOVA) ที่พิจารณาแค่เพียงเส้นทาง ML และ SC จึงถือได้ว่าเป็นข้อได้เปรียบข้อสำคัญของอัลกอริทึม MAP สำหรับอัลกอริทึมการถอดรหัสที่มีการวนลูบ

เครื่องถอดรหัสแบบ Soft-output MAP จำนวนอัตรา a posteriori log-likelihood สำหรับบิตข้อมูล u_i เป็น

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{P\{u_i = 1|r\}}{P\{u_i = 0|r\}} \quad (2.1)$$

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

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

APPs ตามสมการด้านบน สามารถนำมาคำนวณหาค่าได้จาก trellis diagram โดย

$$P\{u_1 = 0|r\} = \sum_{(m',m) \in B_1^0} P\{S_{t-1} = m', S_t = m|r\} \quad (2.2)$$

$$P\{u_1 = 1|r\} = \sum_{(m',m) \in B_1^1} P\{S_{t-1} = m', S_t = m|r\} \quad (2.3)$$

โดยที่ S_{t-1} และ S_t เป็นสถานะของตัวเข้ารหัส ณ เวลาที่ $t-1$ และ t ตามลำดับ และ B_1^0 และ B_1^1 เป็นเซตของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ m' ถึงสถานะ m ที่เกิดจาก $u_i = 0$ และ $u_i = 1$ ตามลำดับ และสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$P\{u_1 = 0|r\} = \sum_{(m',m) \in B_1^0} \frac{P\{S_{t-1} = m', S_t = m|r\}}{P\{r\}} \quad (2.4)$$

$$P\{u_1 = 1|r\} = \sum_{(m',m) \in B_t'} \frac{P\{S_{t-1} = m', S_t = m | r_t^N\}}{P\{r\}} \quad (2.5)$$

โดยที่ $P\{r\}$ เป็นค่าคงที่ เนื่องจากมันไม่มีผลกระทบต่อการทำให้มีค่ามากที่สุดและจะไม่นำไปพิจารณาในการคำนวณต่อไป

เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณหาค่าบิตข้อมูล APPs ฟังก์ชันความน่าจะเป็นต่อไปนี้ได้มีการอธิบายไว้

$$\alpha_t(m) = P\{S_t = m, r_t^i\} \quad (2.6)$$

$$\beta_t(m) = P\{r_{t+1}^N | S_t = m\} \quad (2.7)$$

$$\gamma_t^i(m', m) = P\{u_1 = i, S_t = m, r_t, S_{t-1} = m'\} \quad (2.8)$$

โดยที่

$$r_t = (r_{t,0}, \dots, r_{t,i}, \dots, r_{t,n-1}) \quad (2.9)$$

$$r_t^k = (r_t, r_{t+1}, \dots, r_k) \quad (2.10)$$

ความน่าจะเป็นร่วมของการเปลี่ยนสถานะ $P\{S_{t-1} = m', S_t = m, r\}$ อธิบายได้เป็น

$$P\{S_{t-1} = m', S_t = m, r\} = \alpha_{t-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \beta_t(m) \quad (2.11)$$

โดยที่ $\alpha_t(m)$ และ $\beta_t(m)$ ได้มาจาก

$$\alpha_t(m) = \sum_{m'} \alpha_{t-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \quad (2.12)$$

$$\beta_t(m) = \sum_{m'} \beta_{t+1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\gamma_i^i(m', m) = p_i(u_i=i) \prod_{j=0}^{j=n-1} P\{r_{i,j}|x_{i,j}\} \quad (2.14)$$

$$P\{r_{i,j}|x_{i,j}\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(r_{i,j}-x_{i,j})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.15)$$

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

ถ้าเราสมมติให้ตัวเข้ารหัส (Encoder) เริ่มต้นและจบลงที่สถานะศูนย์ ขอบเขตของเงื่อนไขจะเป็น

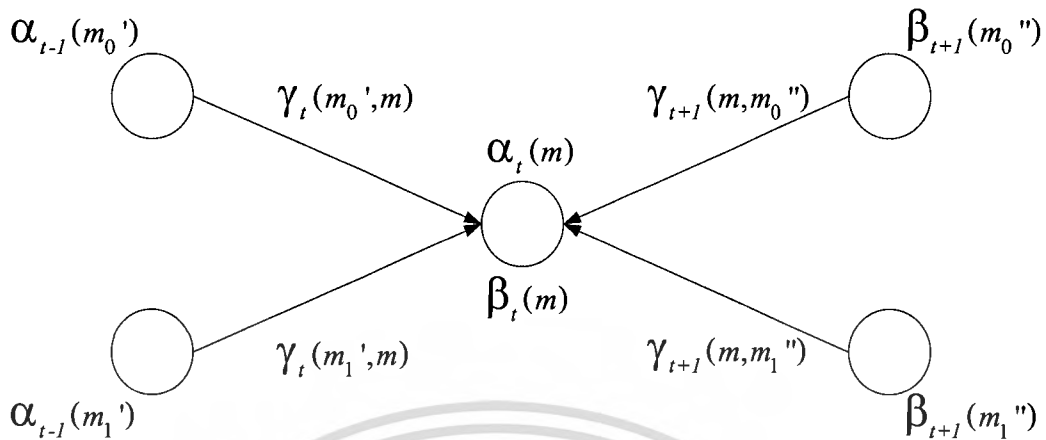
$$\alpha_0(0)=1, \quad \alpha_0(m)=0 \text{ for } m \neq 0,$$

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

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

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{\sum_{(m',m) \in B^1} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i^1(m', m) \beta_i(m)}{\sum_{(m',m) \in B^0} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i^0(m', m) \beta_i(m)} \quad (2.16)$$

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



รูปที่ 2.11 แผนภาพการวนลูบไปข้างหน้าและไปข้างหลัง

รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพที่นำเสนอเรื่อง forward/backward recursion สัมประสิทธิ์ $\alpha_{t-1}(m_i')$ แสดงถึง α coefficient สำหรับสถานะ m_i' ในสถานะที่ $(t-1)th$ ซึ่งเชื่อมต่อกับสถานะ m ในสถานะ trellis และที่การเปลี่ยนแปลงสถานะ $S_{t-1}=m' \rightarrow S_t=m$ ที่มีสาเหตุจากบิตข้อมูล $u_i, i=0,1$ ในทำนองเดียวกัน $\beta_{t+1}(m_i'')$ แสดงถึงสัมประสิทธิ์ β ที่แสดงถึงสถานะ m_i'' ในสถานะ $(t+1)th$ trellis ที่ซึ่งเชื่อมต่อกับสถานะ m ในสถานะ tth trellis และที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ $S_{t-1}=m' \rightarrow S_t=m''$ ที่เกิดจากบิตข้อมูล $u_i, i=0,1$ ค่า APP ของบิตข้อมูลสามารถคำนวณได้จาก

$$P\{u_1=1|r\} = \frac{e^{\Lambda(u_1)}}{1 + e^{\Lambda(u_1)}} \quad (2.17)$$

$$P\{u_1=0|r\} = \frac{1}{1 + e^{\Lambda(u_1)}} \quad (2.18)$$

ค่า APP ของบิตข้อมูลที่ถูกส่งออกไปสามารถคำนวณได้โดยบวกค่าความน่าจะเป็นของคำรหัสที่ประกอบด้วยบิตที่ถูกส่งโดยเฉพาะ นั่นก็คือ

$$P\{x_{t,j}=1|r\} = \sum_{u_i=i, x_{t,j}=1} P\{u_i=i|r\} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P\{x_{t,j} = -1 | r\} = \sum_{u_t = i, x_{t,j} = -1} P\{u_t = i | r\} \quad (2.20)$$

2.5 การวางสลับ (Interleaving)

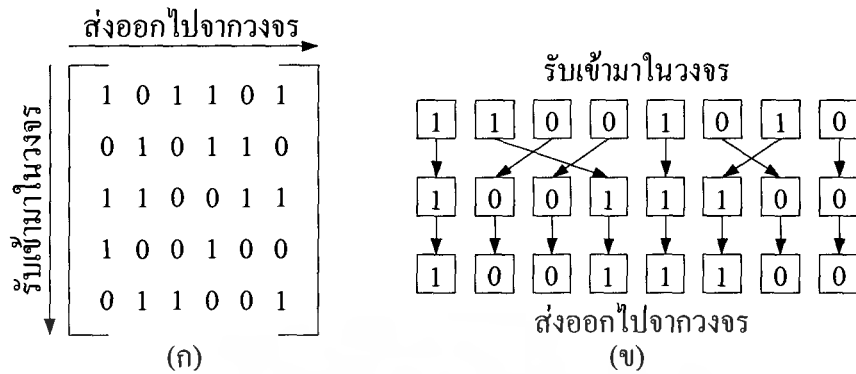
การวางสลับ (Interleaving) ข้อมูลนั้นเป็นวิธีการในการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงข้อมูลดิจิทัลให้มีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากเดิม ซึ่งถูกนำมาใช้ในระบบสื่อสารเพื่อป้องกันการผิดพลาดของข้อมูลในรูปแบบของบิตผิดพลาดที่ต่อเนื่องกันหลายบิต (Burst Error) สำหรับวิธีการที่ใช้ในการวางสลับข้อมูลนั้น จะมีรูปแบบในการทำงานอยู่หลายวิธีการด้วยกัน และในการทำงานแต่ละวิธีการนั้น จะให้ผลลัพธ์ในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยสำหรับตัวอย่างของรูปแบบในการวางสลับข้อมูล ได้แก่ วิธีการวางสลับข้อมูลแบบบล็อก (Block Interleaving) และแบบสุ่ม (Random Interleaving)

2.5.1 การวางสลับข้อมูลแบบบล็อก (Block Interleaving)

วิธีการวางสลับข้อมูลแบบบล็อกนั้นเป็นวิธีการที่นิยมใช้งานสำหรับระบบสื่อสาร เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบของลำดับข้อมูลมีลักษณะการทำงานที่สามารถแสดงโดยใช้เมตริกดังรูป 2.20 การทำงานนั้นจะเริ่มจากการดึงข้อมูลที่จะทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเข้ามาเก็บไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งจะมีการเก็บข้อมูลเรียงจากบนลงล่าง และซ้ายไปขวา โดยจะมีการเก็บข้อมูลในลักษณะนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งหน่วยความจำในวงจรมีการเก็บข้อมูลไว้ทุกตำแหน่งแล้ว จากนั้นจึงส่งข้อมูลออกจากวงจรโดยการเรียงลำดับการส่งจากซ้ายไปขวา และบนลงล่าง และจะมีการส่งข้อมูลในลักษณะนี้เรื่อยๆ จนกระทั่งข้อมูลทุกตำแหน่งในหน่วยความจำถูกส่งออกจากวงจรแล้ว จากนั้นจึงมีการรับข้อมูลชุดต่อไปเข้ามาในวงจรเพื่อทำงานในครั้งต่อไป โดยจะมีการทำงานในลักษณะนี้จนกระทั่งข้อมูลทั้งหมดได้ผ่านกระบวนการวางสลับแล้ว จึงสิ้นสุดการทำงาน

2.5.2 การวางสลับข้อมูลแบบสุ่ม (Random Interleaving)

ในการวางสลับข้อมูลด้วยวิธีการแบบสุ่ม (Random Interleaving) นั้น จะใช้วิธีการสุ่มตัวเลขขึ้นมาเพื่อกำหนดรูปแบบในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล โดยในการทำงานนั้น จะมีการนำข้อมูลมาครั้งละ 1 ชุด เพื่อทำการสลับตำแหน่งของข้อมูลให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ตามรูปแบบของค่าที่ได้จากการสุ่ม โดยจะมีลักษณะในการทำงานดังตัวอย่างในรูปที่ 2.12 เป็นตัวอย่างของการวางสลับข้อมูลแบบสุ่มที่มีการดึงข้อมูลเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 8 บิต เพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล



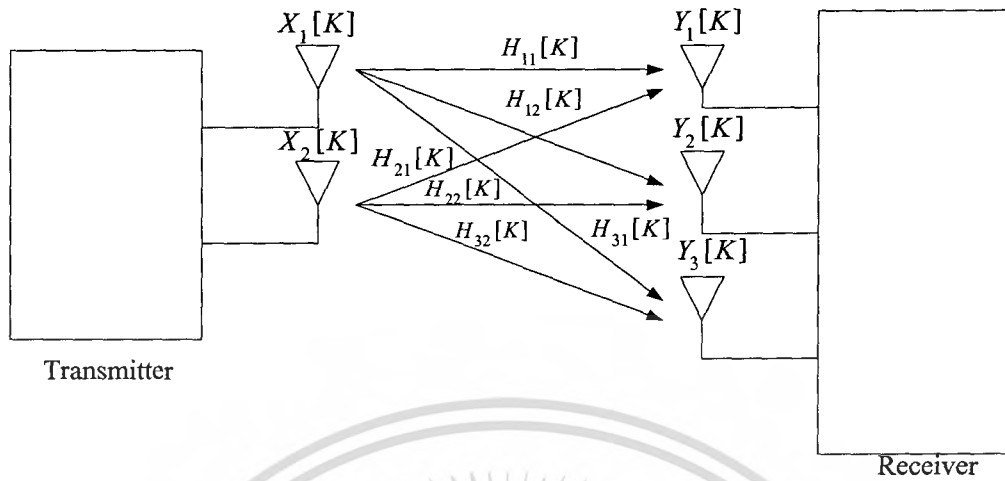
รูปที่ 2.12 การวางสลับข้อมูล (ก) Block Interleaving(ข) Random Interleaving

2.6 ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)

ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (Multiple Input Multiple Output: MIMO) เป็นการส่งข้อมูลโดยใช้หลายเสาอากาศในการส่งสัญญาณและหลายเสาอากาศในการรับสัญญาณ วิธีนี้เพิ่มปริมาณของช่องสัญญาณที่สามารถส่งได้ (Throughput) ในระบบโดยใช้แบนวิดท์ และกำลังในการส่งเท่าเดิม จึงทำให้วิธีนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบได้

คุณสมบัติข้อสำคัญของการสื่อสารไร้สายแบบ MIMO คือสามารถใช้ประโยชน์จากปัญหาที่เกิดจากการส่งข้อมูลเช่น การแพร่กระจายหลายทาง (Multipath Propagation) ในการเพิ่ม Throughput ให้กับระบบ หรือลดอัตราความผิดพลาดบิต มากกว่าการแพร่กระจายหลายทางแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกทางเดียวหรือ SISO (Single Input Single Output)

ในระบบ MIMO นั้น ผู้ส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันผ่านเสาอากาศแต่ละตัวอย่างต่อเนื่องบนช่วงความถี่เดียวกัน และผู้รับเสาอากาศแต่ละตัวก็จะได้รับสัญญาณจากทุกเสาอากาศของผู้ส่ง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การรับส่งสัญญาณแบบ MIMO

จากรูป 2.13 จะเห็นได้ว่าสัญญาณย่อยที่แต่ละเสาอากาศได้รับสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ดังแสดงไว้ด้านล่าง สัญญาณ x_i ถูกส่งจากเสาอากาศ i ($i = 1, \dots, N$) ซึ่งจะผ่านช่องสัญญาณไร้สายและเข้าสู่เสาอากาศตัวรับ j ($j = 1, \dots, M$) สัญญาณที่ได้รับทั้งหมดที่เสาอากาศตัวรับเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$r_j = \sum_{i=1}^N h_{ji} x_i + n_j \quad (2.21)$$

H_{ji} คือ sample ของค่าเชิงซ้อนที่บ่งบอกถึงช่องสัญญาณระหว่างเสาอากาศตัวส่ง i และเสาอากาศตัวรับ j และ n_j มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ สัญญาณเวกเตอร์ที่ได้รับทั้งหมดแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$r = Hx + n \quad (2.22)$$

โดยที่ $r = [r_1, \dots, r_M]$ คือ $M \times 1$ column vector ของสัญญาณที่ได้รับผ่านเสาอากาศตัวรับ M , H คือ $M \times N$ complex channel matrix

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{pmatrix}$$

ข้อดีของ MIMO

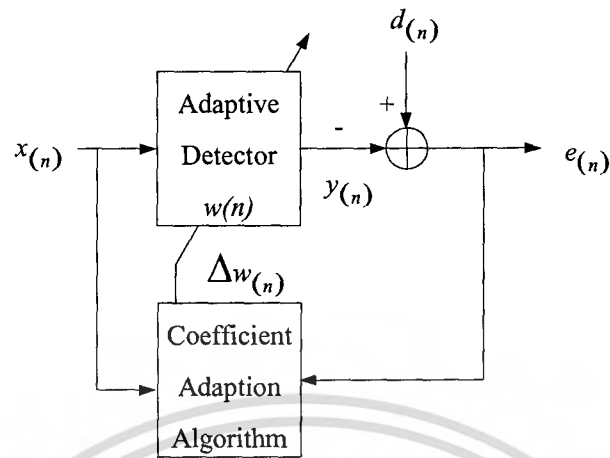
การเพิ่มความเร็วจะไม่ต้องถูกจำกัดด้วยย่านความถี่คลื่นวิทยุที่รัฐบาลเป็นผู้จัดสรรให้อีกต่อไป ซึ่งเป็นการก้าวข้ามทฤษฎีเก่าๆ โดยสิ้นเชิงเพราะแต่ก่อนนี้คนเคยเชื่อกันว่า เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วในการรับ - ส่ง ข้อมูลก็ต้องเพิ่มความกว้างของช่วงความถี่ในการสื่อสาร (Bandwidth) เท่านั้น แต่เนื่องจากการใช้งานคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ต่าง ๆ นั้น รัฐบาลของแต่ละประเทศมีการควบคุมอย่างเข้มงวด โอกาสที่จะเพิ่มความเร็วจึงแทบเป็นไปได้เลย

ข้อเสียของ MIMO

คือความยุ่งยากในการออกแบบและผลิตเสาอากาศที่ต้องมีความเที่ยงตรงเป็นอย่างยิ่ง และเนื่องจากการจัดวางขนาดและระยะตำแหน่งของเสาอากาศในระบบ MIMO ต้องเหมือนกันจึงจะสามารถสื่อสารกันได้

2.7 วงจรกรองแบบปรับค่าได้ (Adaptive Detector)

เครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ใช้หลักการของการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของระบบให้สอดคล้องกับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงเชิงเวลา (Time-varying) ที่ได้รับเข้ามา หลักการทำงานนั้นจะมีตัวแปรสัมประสิทธิ์คูณกับสัญญาณขาเข้าเพื่อให้ได้สัญญาณขาออก จากนั้น สัญญาณขาออกที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) เพื่อหาค่าผิดพลาด และนำค่าผิดพลาดที่ได้ไปปรับค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีขึ้น จำนวนรอบของการวนปรับค่านิ่งสูง สัญญาณที่ได้ก็จะยิ่งดี แนวคิดแบบปรับค่าได้แสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้
 อัลกอริทึมแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันก็คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least Mean Square: LMS) จากรูปที่ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็น

$$y(n) = \sum_{k=0}^{n-1} w_k(n)x(n-k) = W^T(n)X(n) \quad (2.23)$$

$$W(n) = [w_0(n)w_1(n)\dots w_{n-k}(n)]^T \quad (2.24)$$

$$X(n) = [x(n)x(n-1)\dots x(n-N+1)]^T \quad (2.25)$$

- เมื่อ
- $x(n)$ คือ สัญญาณขาเข้าที่ได้รับ
 - $y(n)$ คือ สัญญาณที่ออกจากวงจร
 - $d(n)$ คือ สัญญาณที่ต้องการ
 - $w(n)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับค่า
 - $W(n)$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์
 - $X(n)$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ของสัญญาณขาเข้า

สัญญาณผิดพลาด $e(n)$ ที่เกิดขึ้นหาได้จากค่าต่างระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่ได้รับ

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.26)$$

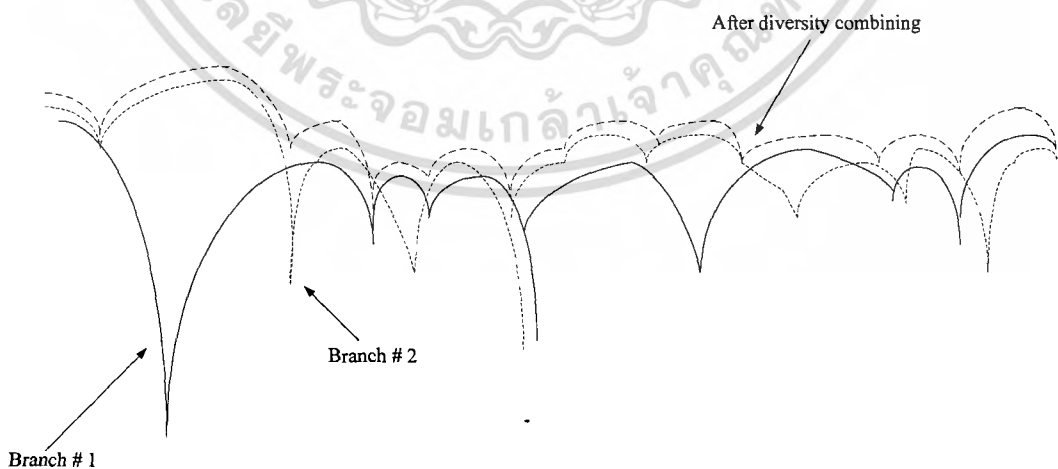
หลังจากนั้นเราจะนำค่าผิดพลาดที่ได้มาปรับปรุงค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์เดิมเพื่อให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นดังสมการ

$$w_k(n+1) = w_k(n) + e(n)x(n-k) \quad (2.27)$$

2.8 เทคนิคการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity Techniques)

ในระบบการสื่อสารไร้สายการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity Techniques) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการลดทอนของสัญญาณจากหลายทิศทาง (Multipath Fading) และเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบการสื่อสารโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มกำลังในการส่งหรือเสียความจุช่องสัญญาณ (Bandwidth)

หลักการของวิธีการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity Techniques) คือ ถ้าได้รับสัญญาณสุ่มอิสระมากกว่า 1 สัญญาณ ถึงแม้สัญญาณนั้นจะถูกลดทอนแต่การลดทอนของสัญญาณสุ่มอิสระแต่ละสัญญาณจะไม่มีความสัมพันธ์กันเลย ดังที่แสดงในรูปที่ 2.15 ยกตัวอย่างเช่น การที่สัญญาณสุ่มบางอันอาจถูกลดทอนหลายๆ ครั้ง ในขณะที่สัญญาณอื่นอาจจะไม่มีการลดทอนเกิดขึ้นเลยก็ได้ นั่นหมายความว่า ความน่าจะเป็นที่สัญญาณสุ่มทั้งหมดจะอยู่ต่ำกว่าระดับที่กำหนด จะมีค่าน้อยกว่าความน่าจะเป็นของสัญญาณสุ่มเพียงสัญญาณเดียวจะต่ำกว่าระดับที่กำหนด ดังนั้นภาครับจะได้รับสัญญาณที่เหมือนกันจากภาคส่งมากกว่า 1 เส้นทาง จึงสรุปได้ว่าวิธีการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) สามารถลดปัญหาการลดทอนที่รุนแรงมากๆ ของสัญญาณได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.15 สัญญาณที่ได้จากการทำไควเวอร์ซิตี และการรวมสัญญาณที่มาจากแต่ละเส้นทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการสื่อสารไร้สายส่วนใหญ่ จะใช้วิธีการทำไคเวอร์ซิตี เพื่อให้ได้คุณภาพของสัญญาณ ขาออกตามที่ต้องการ เทคนิคการทำไคเวอร์ซิตีถูกแบ่งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ๆ คือ การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity) การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) และ การทำสเปซไคเวอร์ซิตี (Space Diversity)

2.8.1 การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity)

การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา ทำโดยการส่งสัญญาณที่เหมือนกัน ในแต่ละช่วงเวลา (Time Slot) ซึ่งทำให้เกิดการลดทอนที่ต่างกันที่เครื่องรับ มีการใช้รหัสควบคุมข้อผิดพลาด (Error control coding) ร่วมกับวิธีการอินเตอร์ลีฟ (Interleave) ซึ่งจะทำให้เกิดการส่งข้อมูลในรูปแบบที่มีการสลับกันของช่วงเวลาในแต่ละคาบการส่ง ทำให้สามารถลดอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ลงได้ เนื่องจากการแก้ไขสัญญาณที่มีความผิดพลาดติดกันเพียงไม่กี่บิตจะทำได้ง่ายกว่าการแก้ไขสัญญาณที่มีความผิดพลาดติดกันหลายบิต แต่การเกิดความผิดพลาดส่วนมากจะเป็นความผิดพลาดที่มีความผิดพลาดติดกันหลายบิต ดังนั้นเมื่อทำการอินเตอร์ลีฟจะเป็นการสลับข้อมูลที่ผู้ส่ง และเมื่อมีความผิดพลาดติดกันหลายบิตเกิดขึ้น หลังจากทำการถอดรหัสอินเตอร์ลีฟ (DeInterleave) แล้ว ความผิดพลาดที่ติดกันหลายบิตจะกลายเป็นความผิดพลาดติดกันเพียงไม่กี่บิต แต่หลายตำแหน่งแทน

การทำวิธีนี้จะได้ผลดีกับการลดทอนแบบจับพลัน (Fast Fading) ซึ่งมีช่องว่างที่ป้องกันการซ้อนทับของช่วงเวลา (Coherence Time of Channel) ขนาดเล็ก สำหรับการลดทอนแบบช้า (Slow Fading) การทำอินเตอร์ลีฟจะทำให้เกิดการหน่วงเวลา (Delay) ซึ่งการใช้งานบางอย่างไม่สมควรที่จะเกิดการหน่วงเวลา ข้อเสียของการทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลาคือมีการซับซ้อนของช่วงเวลาในสัญญาณ แต่ข้อมูลที่ได้รับ (Through Put) เท่าเดิม จึงทำให้เสียประสิทธิภาพของการใช้ความจุช่องสัญญาณ

2.8.2 การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity)

การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) ใช้หลักการส่งข้อมูลที่เหมือนกันไปในหลายช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละช่วงความถี่ที่ถูกแบ่งจะต้องไม่เกี่ยวข้องกับช่วงความถี่อื่น ดังนั้นเพื่อให้แต่ละช่วงความถี่ไม่มีความสัมพันธ์กัน จะต้องมียุ่ของของแต่ละช่วงความถี่ที่มีค่ามากกว่าช่องว่างที่เว้นไว้เพื่อป้องกันการซ้อนทับของช่วงความถี่ (Coherence bandwidth)

ในการสื่อสารของโทรศัพท์มือถือ มีการทำสเปกตรัม (Spread Spectrum) เพื่อขยายสัญญาณที่จะส่งทำให้กับภาครับสัญญาณเพื่อลดความผิดพลาด และการเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานใน

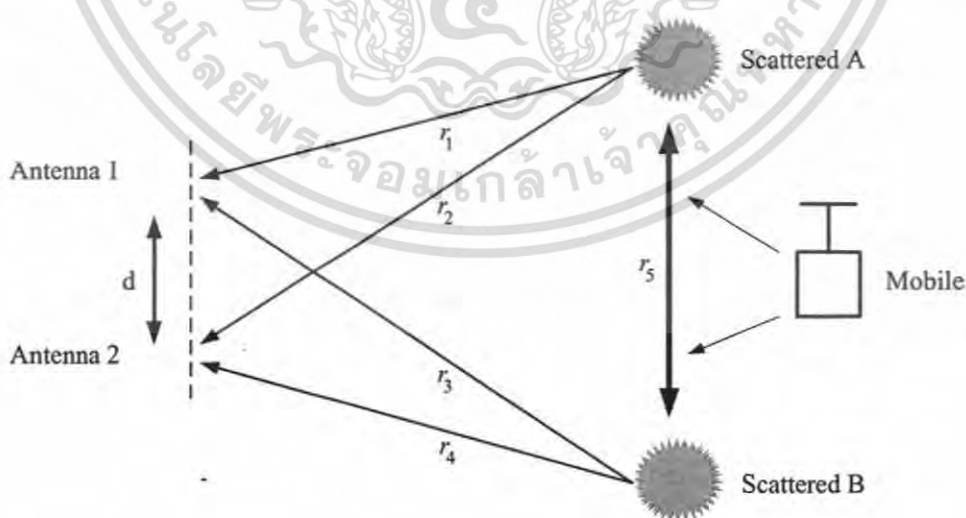
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ เช่น Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) และ การเข้ารหัสแบบหลายสัญญาณพาหะ (Multicarrier Modulation) วิธีสเปกตรัมแผ่กระจาย (Spread Spectrum) ถูกใช้เมื่อช่องว่างที่เว้นไว้เพื่อป้องกันการซ้อนทับของช่วงความถี่นั้นมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเมื่อช่องว่างที่เว้นไว้เพื่อป้องกันการซ้อนทับของช่วงความถี่ มีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณที่ขยายออก (Spreading Bandwidth) จะทำให้เกิดการขยายของการหน่วงเวลาด้วย ในกรณีนี้การทำสเปกตรัมจะไม่มีประโยชน์สำหรับการทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) เลย

ข้อเสียของการทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) คือทำให้เสียความจุช่องสัญญาณเนื่องจากมีความซับซ้อนของช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้น

2.8.3 การทำสเปซไคเวอร์ซิตี (Space Diversity)

การทำสเปซไคเวอร์ซิตีหรือเรียกว่าวิธีการทำไคเวอร์ซิตีตามเสาอากาศ (Antenna Diversity) ก็ได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการสื่อสารไร้สาย หลักการทำงานคือ ใช้หลายเสาอากาศร่วมกันในการส่งหรือการรับสัญญาณ ซึ่งแต่ละเสาอากาศจะวางห่างกันเป็นระยะที่เหมาะสม เพราะระยะห่างมีความสัมพันธ์กับเฟส (Phase) เพื่อที่จะได้รับสัญญาณที่ไม่มีความสัมพันธ์กันทางเฟส จากนั้นทำการส่งสัญญาณที่มีข้อมูลเหมือนกันไปในทุกๆ เสาอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งแตกต่างกับการทำไคเวอร์ซิตีตามเวลาและการไคเวอร์ซิตีตามความถี่ คือ การทำสเปซไคเวอร์ซิตีไม่ทำให้เกิดการสูญเสียความจุช่องสัญญาณ



รูปที่ 2.16 การวางเสาอากาศในการส่งสัญญาณ 2 เสาให้มีความห่างเป็นระยะ d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การทำสเปซไคเวอร์ซิติยังไม่มีการใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เนื่องจากมีต้นทุนที่สูงและพื้นที่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่มีจำกัดจึงไม่สามารถวางให้เสาอากาศห่างกันได้ตามที่กำหนด ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะกับการสื่อสารในอนาคตที่ต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง

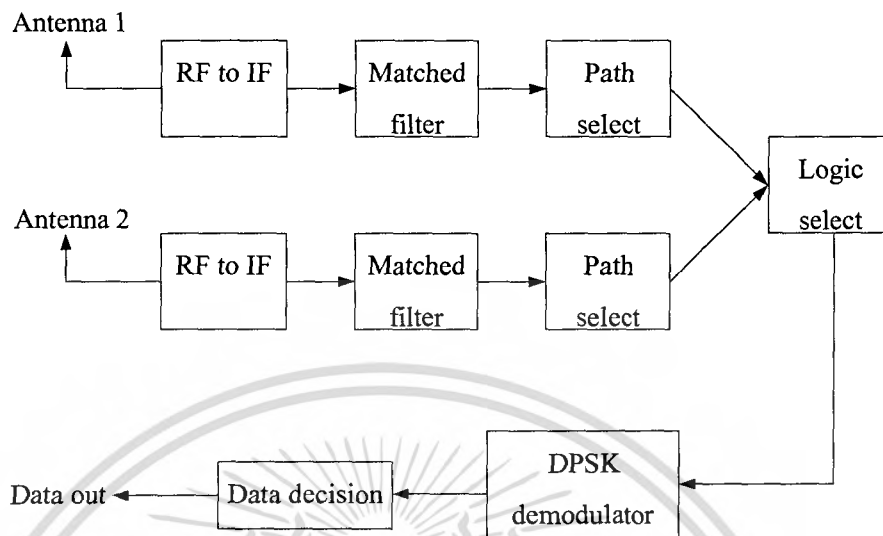
2.9 การรวมไคเวอร์ซิติ (Diversity Combining)

จากหัวข้อที่กล่าวมาแล้วได้กล่าวถึงวิธีการทำไคเวอร์ซิติซึ่งมีการแบ่งประเภทตามประเภทที่แต่ละเส้นทางถูกสร้างขึ้น แต่ถ้าเกิดการลดทอนของสัญญาณเกิดขึ้นในทุกๆ เส้นทางพร้อมๆ กันสัญญาณที่เราได้ก็จะไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นโดยทั่วไปประสิทธิภาพของการสื่อสารที่มีการทำไคเวอร์ซิติ จะขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณในทุกๆ เส้นทางได้รับการรวม (Combining) อย่างไรที่ภาครับเพื่อเพิ่มค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

เนื่องจากการรวมสัญญาณมีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับระดับของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ เราจึงแบ่งประเภทของการรวมสัญญาณออกเป็น 4 ประเภท คือ ซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง (Selective Combining) สวิตซ์คอมไบนิ่ง (Switched Combining) อีควอลเกนคอมไบนิ่ง (Equal Gain Combining; EGC) และแมกซิมีมเรโซคอมไบนิ่ง (Maximal ratio combining; MCR)

2.9.1 ซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง (Selective Combining)

ซีเล็กทีฟคอมไบนิ่งเป็นวิธีการรวมสัญญาณโดยอาศัยหลักการง่ายๆ คือ ภาครับพิจารณาเลือกรับเส้นทางที่มีค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากที่สุด โดยจะทำการตรวจสอบค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนตลอดเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 2.17 ดังนั้นสัญญาณที่ภาครับจึงเป็นสัญญาณที่ดีที่สุดเสมอ ในทางปฏิบัติเราจะใช้สัญญาณที่มีผลรวมกำลังของสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวน (S+N) ที่มีค่ามากสุดในการเลือกสัญญาณ เนื่องจากการวัดค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) นั้นทำได้ยาก



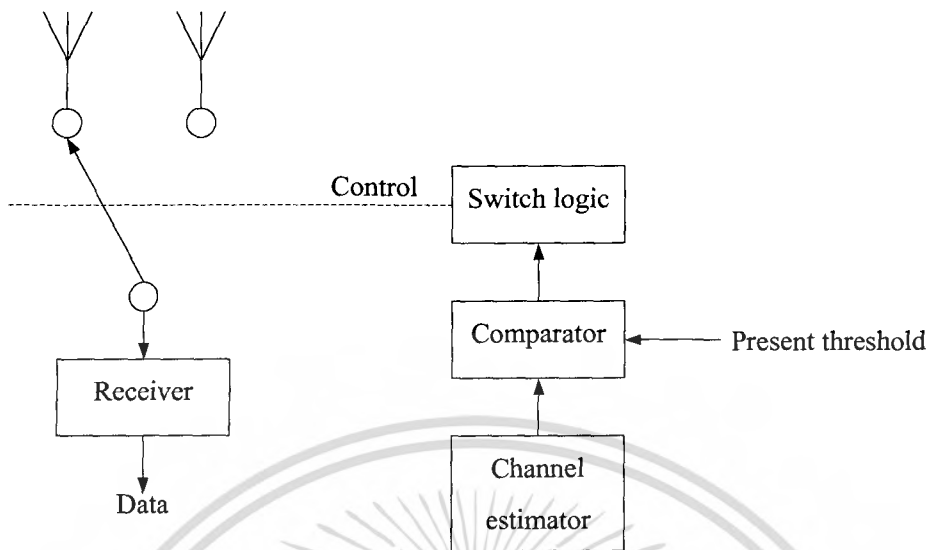
รูปที่ 2.17 โครงสร้างการทำงานของซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง (Selective Combining)

2.9.2 สวิตช์คอมไบนิ่ง (Switched Combining)

สวิตช์คอมไบนิ่งมีหลักการทำงานคือ ภาครับพิจารณาข้อมูลจากทุกๆ ไคเวอร์ซิติ์ที่ส่งมาแล้วจะเลือกสัญญาณมาอันใดอันหนึ่งที่มีค่าอัตราสัญญาณรบกวน (SNR) ดีกว่าระดับที่กำหนดไว้ ภาครับจะใช้สัญญาณที่เลือกมานั้นจนกระทั่งค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นภาครับจะตรวจสอบสัญญาณจากทุกเส้นทางอีกครั้ง เพื่อเลือกสัญญาณอื่นที่มีค่าอัตราต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าที่กำหนดไว้แทน ดังที่แสดงในรูป 2.18 วิธีนี้จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อว่าสแกนนิ่งคอมไบนิ่ง (Scanning Combining)

เมื่อเปรียบเทียบวิธีนี้กับวิธีซีเล็กทีฟคอมไบนิ่งแล้ว สวิตช์คอมไบนิ่งมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า เนื่องจากสัญญาณที่เลือกมาใช้งาน ไม่ใช่สัญญาณที่ดีที่สุดเสมอ อย่างไรก็ตามวิธีนี้นำไปใช้ได้ง่ายกว่าวิธีซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบทุกๆ เส้นทางอยู่ตลอดเวลา

ทั้งวิธีซีเล็กทีฟคอมไบนิ่งหรือวิธีสวิตช์คอมไบนิ่งนั้นมีข้อเสีย คือ สัญญาณที่เลือกมาใช้งานจะได้สัญญาณเพียงสัญญาณเดียวที่ได้จากการทำไคเวอร์ซิติ์เท่านั้น ไม่มีการนำสัญญาณอื่นที่ไม่ได้รับการเลือกมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณเลย



รูปที่ 2.18 โครงสร้างการทำงานของสวิตช์คอมไบน์ (Switched Combining)

2.9.3 อีควอล์เกนคอมไบน์ (Equal-Gain Combining; EGC)

อีควอล์เกนคอมไบน์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพรองจากวิธีรวมแบบเชิงเส้น ซึ่งวิธีนี้ไม่ได้ใช้การประมวลผลของการลดทอนของแต่ละเส้นทาง แต่จะใช้การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ที่ภาครับแทน

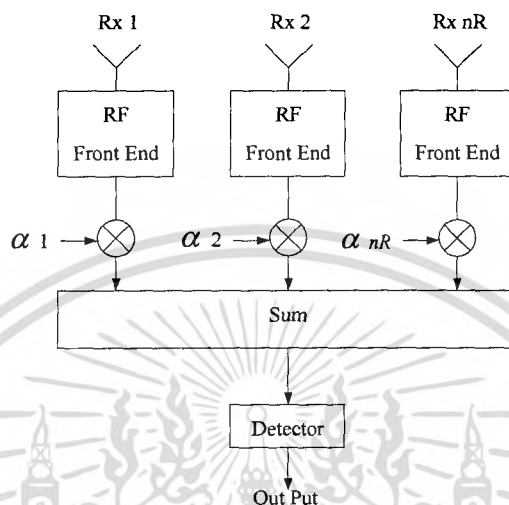
หลังจากการทำงานของอีควอล์เกนคอมไบน์ คือ ภาครับทำการรับสัญญาณจากทุกเส้นทาง และรวมสัญญาณที่มีเฟสตรงกันเข้าด้วยกัน โดยมีค่าน้ำหนักที่เท่ากัน เพื่อให้สัญญาณมีกำลังมากขึ้น ในทางทฤษฎีประสิทธิภาพของการทำอีควอล์เกนคอมไบน์จะต่ำกว่าวิธีแมกซ์ิมัมเรโซคอมไบน์ แต่วิธีนี้มีความซับซ้อนของการทำงานน้อยกว่ามากจึงเป็นที่แพร่หลายในการใช้งาน

2.9.4 แมกซ์ิมัลเรโซคอมไบน์ (Maximal ratio combining; MRC)

แมกซ์ิมัลเรโซคอมไบน์ใช้หลักการที่ว่า สัญญาณแต่ละเส้นทางที่รับมามีค่าถ่วงน้ำหนักที่มีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง ภาครับทำการรวมทุกๆสัญญาณจากทุกๆ เส้นทางเข้าด้วยกัน โดยมีการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุดออกมา ดังที่แสดงในรูป 2.19 โดยเราสามารถคำนวณค่าน้ำหนักได้จากผลของการทำดีมอดูเลชัน (Demodulation) โดยมีวิธีการทำคือ ให้ภาคส่ง ส่งข้อมูล M ชุด ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้คือ ผลรวมของค่าน้ำหนักการดีมอดูเลชันทั้ง M ชุด ค่าน้ำหนักมีค่าเท่ากับค่าจำนวนเชิงซ้อนของแชนแนลเกน (Channel Gain) และต้องทำการคูณสัญญาณ คือ เพื่อชดเชยเฟสที่เลื่อนออกไป (Phase-Shift) ในช่องสัญญาณ สุดท้ายจะได้ค่าน้ำหนักของสัญญาณมีส่วนกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่แรง ดังนั้นสัญญาณที่แรงจะมีค่าน้ำหนักที่มากกว่าสัญญาณที่อ่อนกว่า ซึ่งจะได้ออกผล
คลื่นสัญญาณพาหะที่มีข้อมูลชุดเดียวกัน

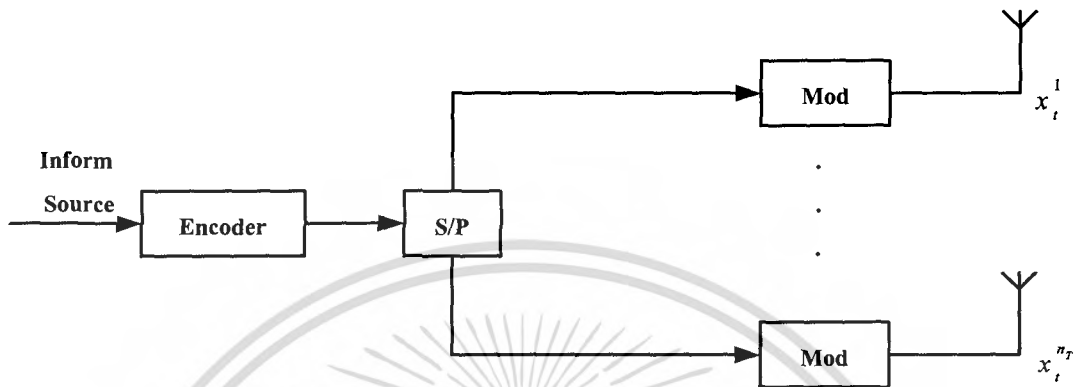


รูปที่ 2.19 โครงสร้างการทำงานของแมกซ์ิมัลร โซคอมไบนิ่ง (Maximal Combining, MCR)

2.10 รหัสเลเยอร์สเปซไทม์ (Layer Space-Time Codes)

Foschini ได้นำเสนอโครงสร้างสถาปัตยกรรมเลเยอร์สเปซไทม์ (Layer Space-Time: LST) ที่
ถูกใช้ในระบบสื่อสารแบบ MIMO สิ่งที่น่าสนใจของสถาปัตยกรรมชนิดนี้คือการประมวลผล
สัญญาณแบบหลายมิติในปริภูมิเวลาโดยใช้การประมวลผลแบบ 1 มิติ โดย 1 มิติ นั้นหมายถึง 1 มิติ
ในปริภูมิเวลา ซึ่งขั้นตอนการวิธีการจะอาศัยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงที่
ภากรับและการเข้ารหัสข้อมูลแบบ 1 มิติที่เป็นการเข้ารหัสแบบดั้งเดิม โดยทั่วไปแล้วลักษณะ
สถาปัตยกรรมที่ได้นำเสนอ จำนวนข้อมูลที่ได้ถูกแบ่งเป็นสายจำนวน n_T สาย โดยที่ภากรับใช้
จำนวนเสารับ $n_R = n_T$ เสาเพื่อที่จะแยกแยะและตรวจจับสัญญาณจำนวนเท่ากับ n_T ขั้นตอนการ
แยกแยะจะทำได้โดยการผสมผสานกันระหว่างการลด(Suppression) และการหักล้าง (Cancellation)
สัญญาณรบกวน สัญญาณที่ถูกแยกแยะนั้นทำการถอดรหัสโดยการถอดรหัสคอนโวลูชันที่ใช้
สำหรับการถอดรหัสแบบ 1 มิติ จึงเป็นผลทำให้มีความซับซ้อนในการทำงานน้อยกว่าการถอดรหัส
แบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (Maximum Likelihood) ความซับซ้อนของเครื่องรับแบบปริภูมิเวลา
จะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับความเร็วของการส่งข้อมูล ในระบบของปริภูมิเวลาจะเพิ่มขึ้น
ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับความเร็วของการส่งข้อมูล ในระบบของปริภูมิเวลาจำนวนของเสาทาง

ฝั่งรับจะต้องมีจำนวนเท่ากับหรือมากกว่าจำนวนเสาทางฝั่งภาคส่งเพื่อให้เป็นผลดีกับการรับ สัญญาณและการถอดรหัสข้อมูล



รูปที่ 2.20 สถาปัตยกรรม VLST

2.10.1 เครื่องส่งปริภูมิเวลา (LST Transmitters)

ในระบบเลเยอร์สเปซไทม์มีสถาปัตยกรรมของเครื่องส่งอยู่มากมายหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับว่ามีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาดหรือไม่และวิธีการในการมอดูเลตสัญลักษณ์ที่ใช้ในเสาอากาศทางฝั่งส่ง ระบบเลเยอร์สเปซไทม์ที่ไม่มีการเข้ารหัสหรือที่เรียกกันว่าเวอติคัลเลเยอร์สเปซไทม์ (Vertical Layered Space-Time: VLST) ดังที่แสดงในรูป 2.21 ข้อมูลอินพุตเขียนแทนได้เป็น c จะถูกแบ่งจากข้อมูลอนุกรมให้เป็นข้อมูลขนานจำนวนเท่ากับ n_T สาย หลังจากนั้นข้อมูลในแต่ละสายจะถูกมอดูเลตโดยวิธีการมอดูเลชันแบบ M ระดับและหลังข้อมูลในแต่ละสายจะถูกส่งออกไปในแต่ละสายอากาศซึ่งการประมวลผลสัญญาณ โดยแบ่งแยกตามสายข้อมูลแต่ละสายจะถูกเรียกว่าชั้นสัญญาณ (Layer) สัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลตจะถูกเรียงในเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง (Transmission Matrix) ซึ่งถูกแทนโดย X ซึ่งมีจำนวนแถวเท่ากับ n_T แถว และจำนวนคอลัมน์เท่ากับ L คอลัมน์โดยที่ L เป็นค่าความยาวของบล็อกข้อมูลที่ส่ง คอลัมน์ที่ t ของเมตริกซ์สัญญาณทางด้านภาคส่งซึ่งเขียนแทนด้วย X_t ซึ่งประกอบด้วยสัญลักษณ์ที่ถูกมอดูเลต $x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^{n_T}$ โดยที่ $t = 1, 2, \dots, L$ ในเวลา t เครื่องส่งจะส่งข้อมูลของคอลัมน์ที่ t ของเมตริกซ์สัญญาณทางด้านภาคส่งหนึ่งสัญลักษณ์ต่อหนึ่งเสาอากาศ เพราะฉะนั้น x_t^i จะถูกส่งจากเสาอากาศส่งที่ i ณ เวลา t โครงสร้างแบบเวอติคัลจะหมายถึงการส่งสัญญาณแบบเป็นลำดับตามคอลัมน์ของเมตริกซ์ในปริภูมิเวลา (Space-Time Domain) การส่งสัญญาณในรูปแบบดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเข้ารหัสคอนโวลูชันซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบ 1 มิติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

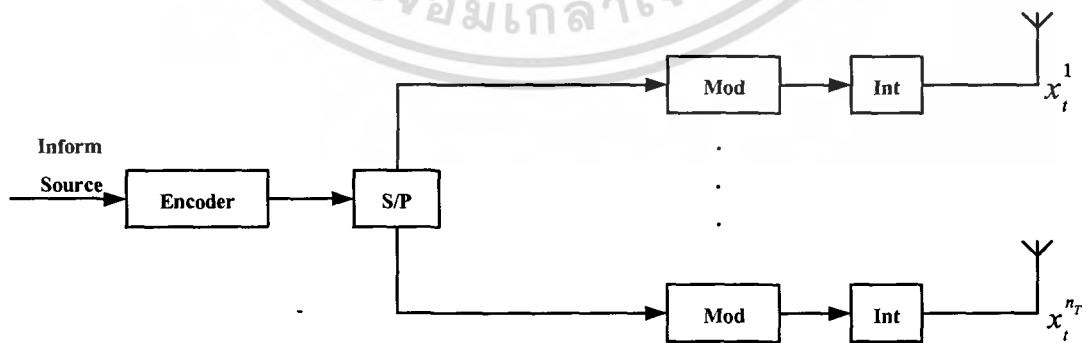
คำว่า 1 มิติหมายถึงปริภูมิเวลาในขณะที่รหัสสามารถเป็นหลายมิติได้ในโดเมนเวลา ซึ่งสถาปัตยกรรมแบบเลเยอร์สเปซไทม์แบบต่างๆ ที่มีการเข้ารหัสได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้สถาปัตยกรรมแบบทริคด์เลเยอร์สเปซไทม์ (Threaded Layered Space Time : TLST) ที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสถาปัตยกรรมแบบฮอริซอนทัลเลเยอร์สเปซไทม์ (Horizontal Layered Space-Time : HLST)

ในสถาปัตยกรรมแบบฮอริซอนทัลเลเยอร์สเปซไทม์ (HLST) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในขั้นแรกข้อมูลจะถูกนำไปเข้ารหัสองค์สัญญาณและจะถูกแบ่งข้อมูลเป็นจำนวน n_T สาย ซึ่งข้อมูลในแต่ละสายจะถูกมอดูเลต อินเตอร์ลีฟ และกำหนดเสาอากาศที่ใช้ในการส่ง ถ้าหากสัญลักษณ์ที่ออกมาจากมอดูเลเตอร์ถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ x_t^i โดยที่ i แสดงถึงหมายเลขของชั้นสัญญาณและ t หมายถึงช่วงเวลา เมทริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งจะเขียนได้เป็น

$$X = \begin{bmatrix} x_t^1 \\ x_t^i \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

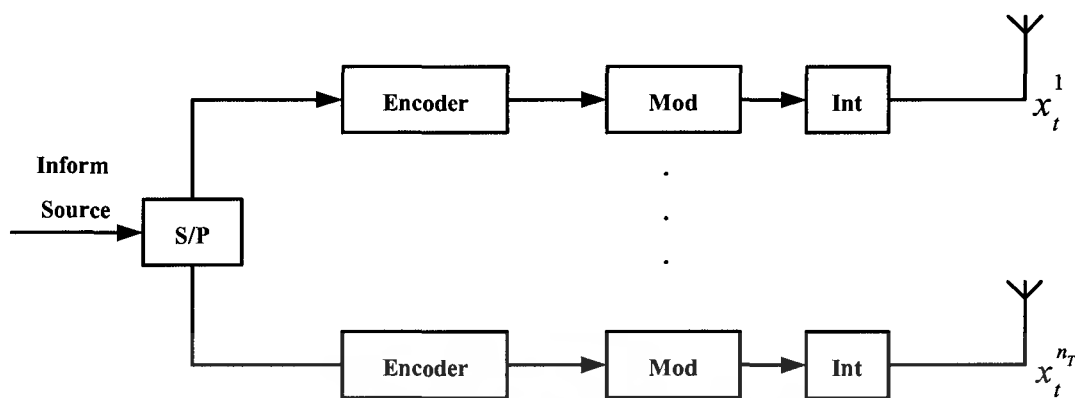
ยกตัวอย่างในระบบที่มีเสาอากาศทางด้านส่งจำนวนสามเสาจะสามารถเขียนเมทริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งได้เป็น

$$X = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & \dots \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & \dots \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 & \dots \end{pmatrix} \tag{2.29}$$

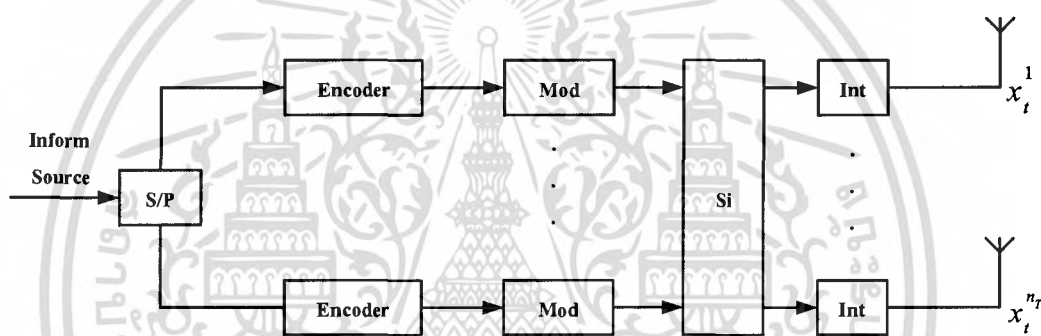


รูปที่ 2.21 สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรรหัสหนึ่งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 สถาปัตยกรรม HLST ที่มีวงจรถ่ายรหัสในแต่ละชั้นสัญญาณ



รูปที่ 2.23 สถาปัตยกรรม DLST หรือ TLST

ชุดข้อมูล $x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, \dots$ จะถูกส่งออกจากเสาส่งที่หนึ่ง ชุดข้อมูล $x_1^2, x_2^2, x_3^2, x_4^2, \dots$ จะถูกส่งออกจากเสาส่งที่สอง และชุดข้อมูล $x_1^3, x_2^3, x_3^3, x_4^3, \dots$ จะถูกส่งออกจากเสาส่งที่สามตามลำดับ

สถาปัตยกรรมแบบ HLST ยังสามารถที่จะนำมาดัดแปลงโดยทำการแยกข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นข้อมูลแบบขนานก่อน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.22 ซึ่งข้อมูลในแต่ละสายข้อมูลย่อยของข้อมูลขนานจะถูกเข้ารหัสอย่างเป็นอิสระต่อกันโดยวงจรถ่ายรหัสช่องสัญญาณ จากนั้นสัญญาณจะถูกทำการอินเทอร์ลีฟ มอดูเลต และหลังจากนั้นสัญญาณจะถูกทำการส่งด้วยเสาอากาศที่ได้ทำการกำหนดไว้ ซึ่งสามารถที่จะสมมุติได้ว่าวงจรถ่ายรหัสช่องสัญญาณในแต่ละชั้นนั้นมีลักษณะที่จำเพาะเจาะจงอย่างไรก็ตามการเข้ารหัสที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นสัญญาณสามารถที่จะกระทำได้

ประสิทธิภาพที่มากกว่าสามารถทำได้โดยการใช้สถาปัตยกรรมแบบไดอากอนอลเลเยอร์สเปซไทม์ (Diagonal Layered Space-Time : DLST) ซึ่งข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสและมอดูเลตจะถูกกระจายไปในแต่ละเสาส่งตามแนวเส้นทแยงมุมของเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง ยกตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งของสถาปัตยกรรมแบบ DLST จะถูกสร้างมาจากเมตริกซ์ X โดยการนำเวลาข้อมูลในแถวที่ i เป็นเวลาเท่ากับ $i-1$ ซึ่งจะทำให้ค่าของสมาชิกที่ไม่เป็นศูนย์เรียงตัวกันในเส้นทแยงมุม สมาชิกของเมตริกซ์ที่อยู่ใต้เส้นทแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมแรกจะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่หนึ่ง สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมที่สองจะถูกส่งด้วยเสาอากาศที่สอง สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมที่สามจะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่สาม สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมที่สี่จะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่สี่ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแบบในแต่ละชุดของวงจรเข้ารหัสของสัญญาณถูกกระจายส่งออกไปด้วยเสาอากาศหลายเสาดังที่แสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งการทำสแปซียลอินเตอร์ลีฟวิ่ง (Spatial Interleaving) ของสถาปัตยกรรมแบบ DLST แสดงได้เป็น

$$\begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & x_5^1 & x_6^1 & \dots \\ 0 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & x_5^2 & \dots \\ 0 & 0 & x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 & \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_1^1 & x_1^2 & x_1^3 & x_4^1 & x_4^2 & x_4^3 & \dots \\ 0 & x_2^1 & x_2^2 & x_2^3 & x_5^1 & x_5^2 & \dots \\ 0 & 0 & x_3^1 & x_3^2 & x_3^3 & x_6^1 & \dots \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

แถวของเมตริกซ์ที่อยู่ทางด้านขวาของสมการที่ 2.30 มาจากการเรียงตัวในแนวเส้นทแยงมุมของเมตริกซ์ทางด้านซ้ายมือ ซึ่งแถวแรกของเมตริกซ์จะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาแรก แถวที่สองของเมตริกซ์จะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่สอง แถวที่สามของเมตริกซ์จะถูกส่งด้วยเสาอากาศเสาที่สาม

การจะลำดับชั้นของสัญญาณตามแนวเส้นทแยงมุมทำให้ได้โคเวอร์ซิตีแบบปริภูมิเวลา (Space Diversity) และจะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มากกว่าการจัดเรียงไปตามแนวนอน

อย่างไรก็ตามจะเกิดการสูญเสียประสิทธิภาพของการใช้สแปซียลอินเตอร์ลีฟ ในสถาปัตยกรรมแบบ DLSC ที่เกิดจากการที่มีสมาชิกภายในเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งที่มีค่าเป็น 0

ซึ่งสถาปัตยกรรมที่นำมาใช้ในโครงการนี้คือสถาปัตยกรรมแบบ TLST ที่ได้ดัดแปลงมาจากสถาปัตยกรรมแบบ HLST โดยการเพิ่มส่วนของการทำสแปซียลอินเตอร์ลีฟเวอร์ (Spatial Interleaver : SI) ก่อนที่ข้อมูลจะเข้าสู่การทำอินเตอร์ลีฟเชิงเวลา (Time Interleave) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.22 โดยวงจรอินเตอร์ลีฟเชิงเวลาจะทำการสลับตำแหน่งแบบสุ่ม โดยจะมีการสร้างลำดับของการสลับลำดับบิต (Fixed Random Permutation) และจะสลับข้อมูลตามลำดับนี้ ยกตัวอย่างจากข้อมูลที่จะส่งออกจากเสาอากาศส่งที่หนึ่งจะมีลำดับการเรียงดังนี้ $x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, x_5^1, x_6^1, x_7^1, x_8^1$ เมื่อผ่านวงจรการทำอินเตอร์ลีฟเชิงเวลาจะได้ข้อมูลเรียงใหม่ได้เป็น $x_1^1, x_3^1, x_6^1, x_8^1, x_2^1, x_7^1, x_4^1, x_5^1$

ในระบบที่มีเสาอากาศทางด้านภาคส่งเท่ากับ 3 เสา ($n_T = 3$) การทำสเปซซีลอินเตอร์ลีฟสามารถแสดงได้เป็น

$$\begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & \dots \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & \dots \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & x_4^3 & \dots \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^3 & x_3^2 & x_4^1 & \dots \\ x_1^2 & x_2^1 & x_3^3 & x_4^2 & \dots \\ x_1^3 & x_2^2 & x_3^1 & x_4^3 & \dots \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

ซึ่งสมาชิกของเมตริกซ์มอดคูลุเลชันจะแสดงทางด้านซ้ายมือของสมการที่ 2.31 ซึ่งสามารถเขียนเป็น x_t^i แสดงถึงสัญลักษณ์การมอดคูลุชันของชั้นสัญญาณที่ i และที่เวลา t เมตริกซ์ทางด้านซ้ายของสมการที่ 2.34 สามารถเขียนได้เป็น X' ซึ่งเป็นเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่งของสถาปัตยกรรม TLST ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่ได้จากการมอดคูลุเลต $x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, \dots$ จะถูกสร้างจากวงจรมอดคูลุเลตในชั้นสัญญาณที่ 1,3,2 และ 1 ตามลำดับที่จะถูกส่งด้วยเสาอากาศส่งที่ 1

วงจรสเปซซีลอินเตอร์ลีฟในสถาปัตยกรรมแบบ TLST สามารถถูกแสดงด้วยวงจรมอดคูลุเลตแบบไซคลิกชิฟต์ (Cyclic-Shift) ถ้าเมตริกซ์ทางด้านซ้ายของสมการ 2.31 คือ X ในคอลัมน์แรกของเมตริกซ์ของสัญญาณทางภาคส่ง X' จะเหมือนกับคอลัมน์แรกของ X ในคอลัมน์สองของเมตริกซ์ของสัญญาณทางภาคส่ง X' จะเหมือนกับคอลัมน์สองของ X ที่ถูกทำ cyclic-shift 1 ตำแหน่ง X ในคอลัมน์สามของเมตริกซ์ของสัญญาณทางภาคส่ง X' จะเหมือนกับคอลัมน์สามของ X ที่ถูกทำ cyclic-shift 2 ตำแหน่ง X ในคอลัมน์สี่ของเมตริกซ์ของสัญญาณทางภาคส่ง X' จะเหมือนกับคอลัมน์สี่ของ X และเป็นไปตามหลักการของไซคลิกชิฟต์ สำหรับคอลัมน์ต่อไป ซึ่งเราสามารถแทนที่สมาชิกของ X' เป็น $x_t^{i'}$ ซึ่งการเปลี่ยนค่า x_t^i เป็นค่า $x_t^{i'}$ สามารถเขียนได้เป็น

$$x_t^{i'} = x_t^i, i' = [(i+t-2) \bmod n_T] + 1 \quad (2.32)$$

ประสิทธิภาพของสเปซซีลของสถาปัตยกรรมแบบ HLST และ TLST คือ Rmn_T โดยที่ Rmn_T คือค่า code rate และ m คือจำนวนของบิตต่อสัญลักษณ์ ซึ่งประสิทธิภาพของสเปซซีลของสถาปัตยกรรม DLST จะลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากค่า 0 ภายในเมตริกซ์ของสัญญาณทางด้านภาคส่ง

2.10.2 เครื่องรับปริภูมิเวลา (LST Receivers)

เพื่อให้เป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์โครงสร้างสถาปัตยกรรมแบบเลเยอร์สเปซไทม์ สมมุติให้การจัดชั้นสัญญาณเป็นแบบการจัดสัญญาณแบบแนวนอน (Horizontal Layering) ที่มีการเข้ารหัสแบบไบนารีและการมอดูเลชันแบบ BPSK

ไดเวอร์ซิตีทางด้านภาคส่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแบบสแปซียล สัญญาณได้ถูกส่งออกจากเสาอากาศหลายเสาแพร่กระจายไปตามเส้นทางที่เป็นอิสระต่อกัน และเกิดการรบกวนกันเองที่ภาครับ ซึ่งการรบกวนกันสามารถแสดงได้ดังนี้

$$r_t = Hx_t + n_T \quad (2.33)$$

โดยที่ r_t เป็นคอลัมน์เมตริกซ์ที่เป็นองค์ประกอบ n_R ของสัญญาณที่ได้รับของเสาอากาศรับจำนวน n_R เสา x_t เป็นเมตริกซ์คอลัมน์ที่ t ของเมตริกซ์ของสัญญาณทางดานภาคส่ง X และ n_T เป็นคอลัมน์เมตริกซ์ที่เป็นองค์ประกอบ n_R ของสัญญาณรบกวนประเภท AWGN ที่มาจากเสาอากาศทางด้านรับ โดยที่ค่าความแปรปรวนที่แต่ละเสาอากาศจะมีค่าเท่ากับ σ^2 ถ้าหากโครงสร้างที่ใช้เป็นแบบที่มีการทำสแปซียลอินเตอร์ลีฟ เวกเตอร์ x_t จะเป็นคอลัมน์ที่ t ของเอาต์พุตที่ออกมาจากวงจรสแปซียลอินเตอร์ลีฟซึ่งแทนด้วย X' ซึ่งเพื่อความเข้าใจง่ายเราสามารถเขียนเมตริกซ์ r_t, x_t และ n_T เป็น r, x และ n

โครงสร้างแบบปริภูมิเวลาสามารถเป็นระบบ CDMA ที่มีการซิงโครไนส์ (Synchronous CDMA) ที่จำนวนของเสาอากาศส่งเท่ากับจำนวนของผู้ใช้งาน ซึ่งการรบกวนกันระหว่างเสาอากาศส่งจะมีค่าเท่ากับค่าสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่น (Multiple Access Interference : MAI) ในระบบ CDMA ในขณะที่สัมประสิทธิ์การจางหายเชิงซ้อนมีความสัมพันธ์กับรหัสแผ่ การวิเคราะห์นี้สามารถนำมาขยายเพื่อใช้กับวิธีการทำงานของเครื่องรับได้ ดังนั้นเครื่องรับประเภทหลายผู้ใช้งานที่ออกแบบมาสำหรับ CDMA สามารถที่จะมาดัดแปลงเพื่อใช้งานกับ LST ภายใต้หลักการเหล่านี้ เครื่องรับที่ออปติ멈ที่สุดสำหรับระบบ LST ที่ไม่มีการเข้ารหัสคือเครื่องรับหลายผู้ใช้งานแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุดเหมือนกับในวิธีแบบไวเทอร์บี ความซับซ้อนของวิธีการนี้จะเป็นแบบอัตราเอ็กซ์โพเนนเชียลกับจำนวนเสาอากาศทางภาคส่ง

สำหรับระบบเลเยอร์สเปซไทม์ที่มีการเข้ารหัส เครื่องรับออปติ멈จะเป็นการทำงานที่ต้องร่วมกันระหว่างการรับสัญญาณและถอดรหัสข้อมูลซึ่งทำได้โดยการผสมกันระหว่างรหัสเทอร์ลิสของเลเยอร์สเปซไทม์ และการเข้ารหัสของสัญญาณ ความซับซ้อนของเครื่องรับจะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของโปรดักของจำนวนเสาอากาศส่งและอันดับหน่วยความจำรหัส ซึ่งเป็นผลทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เครื่องรับแบบออปติคัมไม่สามารถที่จะนำมาใช้งานในทางปฏิบัติได้ยกเว้นสำหรับการใช้งานเสอากาศส่งจำนวนน้อยเท่านั้นจึงเป็นสาเหตุที่มีการวิจัยเครื่องรับที่มีสมรรถนะรองลงมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน

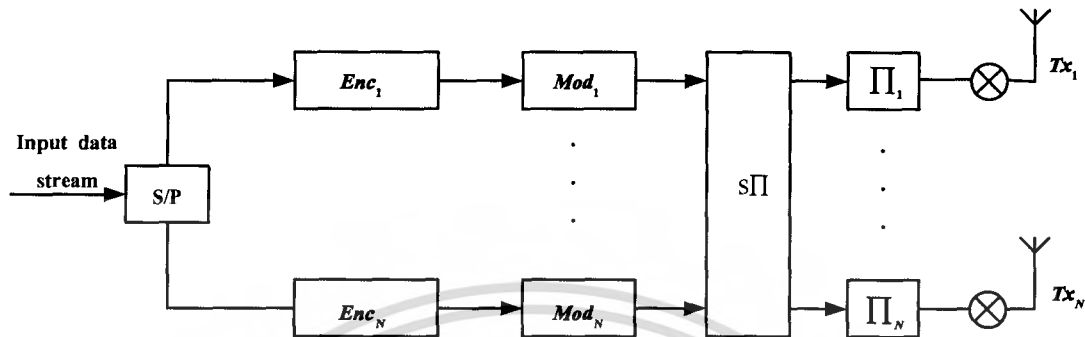
ในโครงงานนี้ผู้จัดทำได้ศึกษาโครงสร้างเครื่องรับสัญญาณแบบสเปซไทม์ซันติวน์ปรับค่าได้ โดยเป็นการออกแบบวงจรรับสัญญาณที่สามารถทำการปรับค่าสัญญาณแบบวนกลับ โดยสามารถรองรับเสาอากาศในการรับส่งสัญญาณเป็นจำนวน $M \times N$ ตัว ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ที่จะมีบทบาทสำคัญต่อการใช้งานในอนาคต ตัววงจรที่ออกแบบนี้สามารถทำการจำลองสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณกำหนดจำนวนเสาอากาศ และยังสามารถกำหนดจำนวนรอบของการป้อนกลับเพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสัญญาณทั้งจากการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) และจากเครื่องรับสัญญาณวนซ้ำแบบปรับค่าได้

เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างของตัวรับสัญญาณได้แล้ว จึงทำการทดสอบการทำงานของตัวรับสัญญาณที่ออกแบบ โดยเริ่มต้นจากการศึกษาเครื่องรับสัญญาณ โดยเริ่มทำการทดลองตั้งแต่สัญญาณเข้าและสัญญาณออกทางเดียว (SISO) คือมีเสาอากาศในการรับและส่งฝั่งละ 1 เสา เพื่อทดสอบอัตราการผิดพลาดที่เกิดขึ้น จากนั้นเพิ่มความซับซ้อนโดยทำการเพิ่มจำนวนเสาอากาศทั้งในฝั่งรับและฝั่งส่ง เพื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการผิดพลาดที่เกิดขึ้น

อย่างไรก็ตาม การทำงานของตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามที่ออกแบบ ได้ใช้ข้อมูลที่มีการป้อนย้อนกลับ (Feedback) จากเสาอากาศอื่นมาปรับตัวกรองสัญญาณ เพื่อจัดสัญญาณรบกวนจากเสาอากาศอื่นออกจากระบบ การป้อนย้อนกลับ นั้นยังมีการทำหลายรอบก็จะลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการป้อนย้อนกลับหลายรอบเท่าไรก็จะยิ่งเพิ่มภาระระบบมากยิ่งขึ้น แต่ทำให้ผลดีขึ้นในอัตราที่ลดลงจึงต้องกำหนดจำนวนรอบการป้อนกลับให้มีความเหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจำลองการทำงาน โดยมีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ให้มีจำนวนรอบต่างกัน เพื่อให้สามารถประเมินค่าสัญญาณรบกวนที่สามารถลดลงไปได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

เนื่องจากการที่สัญญาณที่ได้มานั้นต้องทำการป้อนย้อนกลับหลายรอบจึงทำให้ระบบนั้นมีความซับซ้อนสูงจึงได้ทำการออกแบบตัวรับที่มีการทำงานแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงความถี่ขึ้น เพื่อทำการลดความซับซ้อนที่เกิดขึ้น

3.1 การออกแบบเครื่องส่งสัญญาณ (Transmission structure)



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเครื่องส่งที่มีการเข้ารหัสเลเซอร์สเปซไทม์

โครงสร้างเครื่องส่งสัญญาณแบบ TLST ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งในโครงสร้างนั้นประกอบไปด้วยจำนวนจำนวนเสาอากาศส่งจำนวน N เสา และเสาอากาศฝั่งรับจำนวน M เสา เมื่ออินพุตรับข้อมูลไบนารีมาจะทำการแปลงจากข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นข้อมูลแบบขนาน (Function Serial Parallel) เพื่อแบ่งการส่งออกไปในแต่ละเสาอากาศ

จากนั้นสัญญาณจะถูกเข้ารหัส (Encode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution) เพื่อความปลอดภัยและเพิ่มขีดในการตรวจสอบข้อผิดพลาด จากนั้นสัญญาณจะถูกทำการโมดูเลชัน (Modulation) เพื่อเปลี่ยนบิตให้พร้อมทำการส่ง

เพื่อให้สัญญาณผิดพลาดน้อยลงไปอีก จะทำการสลับบิตข้อมูลที่อยู่ต่างระดับชั้นอย่างมีรูปแบบเพื่อให้บิตกระจายกันออกไปในทุกระดับชั้นเรียกกระบวนการนี้ว่าการเข้ารหัสแบบสเปซไทม์อินเตอร์ลีฟ (Spatial Interleaver: SI) ซึ่งจะช่วยให้ฝั่งรับสามารถตรวจสอบและแก้ไขบิตที่เกิดความผิดพลาดได้ง่ายขึ้น

จากนั้นจะทำการสลับบิตที่ติดกันในระดับชั้น (Layer) เดียวกันให้กระจายกันออกไปเรียกว่าการเข้ารหัสอินเตอร์ลีฟตามช่วงเวลา (Time Interleave: TI) ซึ่งจะช่วยให้ฝั่งรับสามารถตรวจสอบและแก้ไขบิตที่ผิดพลาดได้ง่ายขึ้น

สัญลักษณ์ของแต่ละชั้นสัญญาณถูกส่งออกไปพร้อมกัน โดยมีการชิง โครนัสกันจากเสาส่งทั้งหมด N เสาผ่าน MIMO

3.2 การออกแบบภาครับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative Detector)

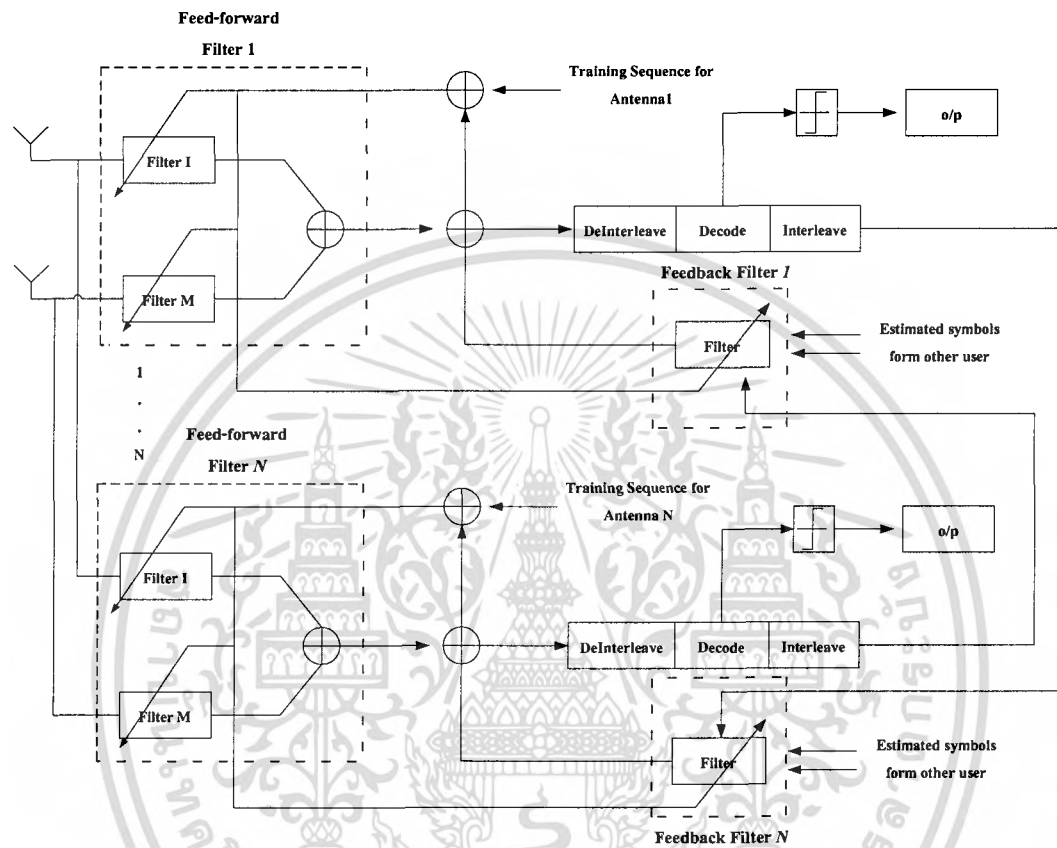
แนวคิดหลักของการทำงานของ ตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ คือ ปรับค่าตัวแปรภายในตัวรับสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุด โดยปกติสัญญาณที่ได้รับมาจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) อยู่มากในกรณีที่เรารู้ค่าของช่องสัญญาณ การขจัดสัญญาณรบกวนสามารถทำได้โดยเครื่องรับสัญญาณในฝั่งรับนำข้อมูลที่รับมาคูณกับสัมประสิทธิ์ค่าหนึ่งซึ่งจะมีการปรับค่าเรื่อยๆ เพื่อให้ใกล้เคียงกับส่วนกลับของช่องสัญญาณ ทำให้เราได้ข้อมูลที่ถูกต้องคืนมา การปรับค่านี้ทำได้โดยนำข้อมูลที่ได้จากคุณครั้งแรกมาเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) แล้วนำข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ โดยวนเป็นจำนวนหลายๆ รอบ ก็จะได้ค่าส่วนกลับที่ใกล้เคียงกับสภาพช่องสัญญาณมากที่สุด ซึ่งในระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) นั้นสัญญาณที่เราได้รับนอกจากจะประกอบด้วยสัญญาณที่เราพิจารณาแล้วยังประกอบด้วยสัญญาณของผู้ใช้งานรายอื่นในระบบด้วย ซึ่งเราจะต้องนำมาหักลบออกจากสัญญาณที่เราพิจารณาด้วย จำนวนรอบของการป้อนกลับยิ่งมากก็จะยิ่งทำให้สัญญาณที่ได้รับดีขึ้น ตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เป็นตัวรับสัญญาณของ 1 ผู้ใช้งาน โดยเราจะมองภายใน 1 ผู้ใช้งานว่ามีวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากเสาอากาศของตัวเองจากการสื่อสารแบบ MIMO โดยจะมีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ของแต่ละเสาอากาศเพื่อหักล้างสัญญาณรบกวนออก ดังนั้นเราจะได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น ตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เป็นตัวรับสัญญาณของ 1 ผู้ใช้งาน โดยเราจะมองภายใน 1 ผู้ใช้งานว่ามีวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวน ที่เกิดจากเสาอากาศของตัวเองจากการสื่อสารแบบ MIMO โดยจะมีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ของแต่ละเสาอากาศเพื่อหักล้างสัญญาณรบกวนออก ดังนั้นเราจะได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น

จากรูปที่ 3.2 เมื่อตัวรับได้รับสัญญาณมา ส่วนหนึ่งใช้เป็นสัญญาณของเสาอากาศที่เราต้องการอีกส่วนหนึ่งเราจะแยกไปเพื่อหาสัญญาณของเสาอากาศอื่นที่เป็นสัญญาณรบกวน ซึ่งมีสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) ต่างกันออกไป

สัญญาณจาก 2 เสาอากาศจะผ่านตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive filter) 2 ตัว ซึ่งในครั้งแรกจะยังไม่มีมีการปรับค่าใดๆ แล้วนำสัญญาณจาก 2 เสาอากาศที่ผ่านตัวกรองสัญญาณ (Filter) แล้วรอให้ข้อมูลส่งมาครบทั้งเฟรม (Frame) ก่อน เพื่อให้สามารถทำกระบวนการถอดรหัสอินเตอร์ลีฟ (DeInterleave) ได้

ซึ่งกระบวนการถอดรหัสอินเตอร์ลีฟนั้นทำ 2 ส่วนด้วยกัน คือส่วนหนึ่งจะนำไปทำการถอดรหัสการอินเตอร์ลีฟตามช่วงเวลา (DeTime Interleave) จากนั้นจะมาทำการถอดรหัสสเปเชียลอินเตอร์ลีฟ (DeSpatial Interleave) แล้วทำการถอดรหัส (Decode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution)

เพื่อทำการตรวจสอบบิตที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นและทำการแก้ไขสัญญาณ ถ้าความผิดพลาดนั้นเป็นความผิดพลาดขนาดเล็ก



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้

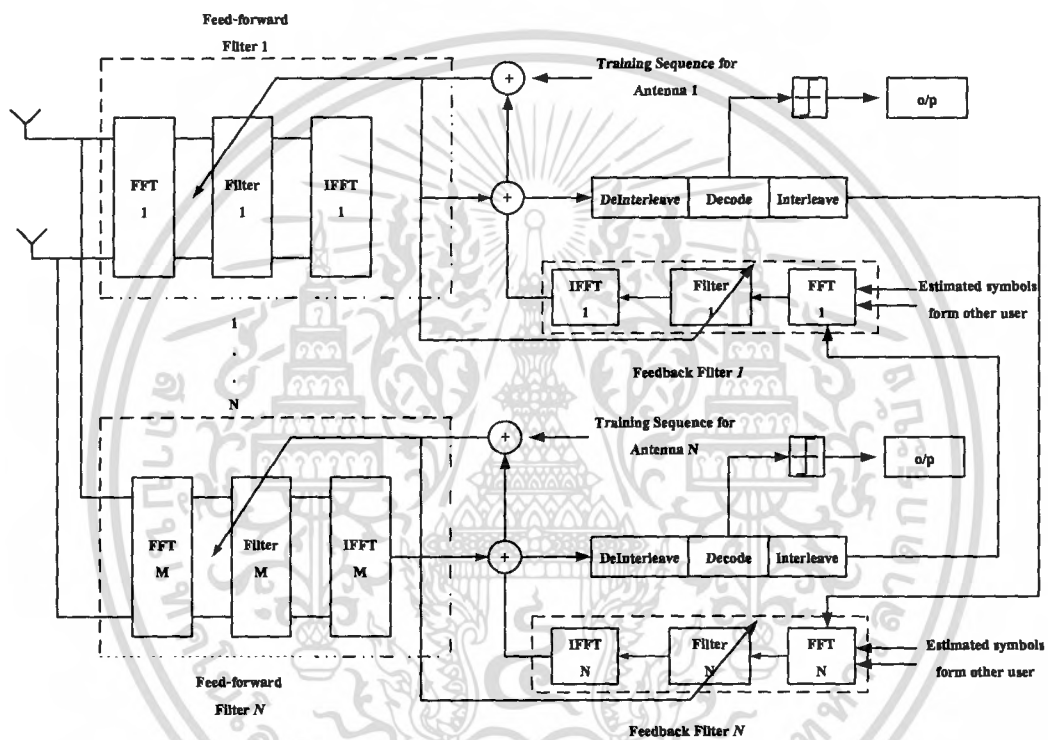
สัญญาณส่วนหนึ่งจะถูกนำไปหาอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เพื่อพิจารณาว่า สัญญาณที่ได้รับนั้นคือพืที่จะออกจากการทำงานที่เทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Training Mode) แล้วใช้เป็นข้อมูลจริงได้หรือยัง ถ้าอัตราความผิดพลาดบิตอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็จะนำข้อมูลนั้นไปเป็นสัญญาณออก (Output) ต่อไป แต่ยังมีข้อมูลส่วนหนึ่งที่ถูกนำไปทำการเข้ารหัสอินเตอร์ลีฟ (Interleave) แล้วส่งไปยังเสาอากาศอื่น เพื่อให้เสาอากาศอื่นนำสัญญาณของเสาอากาศที่เราพิจารณาไปลดสัญญาณรบกวน เพราะเนื่องจากสัญญาณของเสาอากาศที่พิจารณาจะไปเป็นสัญญาณรบกวนของเสาอากาศอื่น

อีกส่วนหนึ่งจะนำไปเทียบกับค่าสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) เพื่อทำการปรับค่าให้กับตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive filter) ทั้ง 2 ตัวของเสาอากาศนี้ และไปปรับค่าของตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองสัญญาณแบบปรับค่าได้ ที่จะกรองสัญญาณจากเสาอากาศอื่นที่รับมาเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากเสาอากาศอื่น

3.3 การออกแบบภากรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าในเชิงความถี่ (Frequency domain adaptive Iterative detector)



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้ในเชิงความถี่

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้รับมาทั้งหมดจะผ่านกระบวนการแปลง (Transformer) กลายเป็นเชิงความถี่โดยใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) จากนั้นสัญญาณที่ผ่านการแปลงจะเข้ากระบวนการตัวกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า (Feed-Forward filter) เพื่อเตรียมการทำคอนโวลูชันในเชิงความถี่ (Frequency domain) จากนั้นสัญญาณจะถูกทำการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) ทำให้จากสัญญาณเชิงความถี่ (Frequency domain) กลายเป็นสัญญาณในเชิงเวลา (Time domain)

เมื่อรับสัญญาณ r_t ข้ามเสาอากาศฝั่งรับ M ดังในรูปที่ 3.3 ที่ช่วงเวลา t เป็นการแปลงให้อยู่ในรูปเชิงความถี่ (Frequency domain) โดยใช้ FFT เอาท์พุทส่วน FFT แทนโดย Ω_t ซึ่ง t เป็นการรับสัญญาณเวกเตอร์เวลา เช่น t ในเชิงความถี่

$$\Omega_t = \text{fft}(r_t) \quad (3.1)$$

ที่
$$\Omega_t = [\Omega_t^1, \Omega_t^2, \dots, \Omega_t^q, \dots, \Omega_t^M] \quad (3.2)$$

และ
$$\Omega_t = \sum_{l=0}^{M-1} r_t^l e^{\frac{-j2\pi ql}{M}} \quad (3.3)$$

FFT (.) แทนการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) และ Ω_t^q , $q = 1, \dots, M$ คือการแปลง FFT ของการรับสัญญาณข้ามมายังเสาอากาศฝั่งรับ M ให้ $w_f^{i,k}(t)$ เป็น $M \times 1$ ในรูปเชิงเวลา (Time domain) ของเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ในแถบวงจรรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าสำหรับเสาส่งลำดับที่ i ระหว่างการวนรอบที่ k ที่เวลาคงที่ t โดยให้

$$w_f^{i,k}(t) = [w_{f,0}^{i,k}(t), \dots, w_{f,q}^{i,k}(t), \dots, w_{f,M-1}^{i,k}(t)]^T \quad (3.4)$$

ซึ่ง $w_{f,b}^{i,k}(t)$, $q = 1, \dots, M$ คือ สัมประสิทธิ์การป้อนข้อมูลไปข้างหน้าตรงกันกับ เสาอากาศลำดับที่ q ให้ $\Psi_{f,t}^{i,k}$ แสดงให้เห็นถึง FF การแปลงสัญญาณของ $w_f^{i,k}(t)$ นิยามโดย

$$\Psi_{f,t}^{i,k} = \text{fft}(w_f^{i,k}(t)) \quad (3.5)$$

โดย
$$\Psi_{f,t}^{i,k} = [\Psi_{f,t}^{i,k}(0), \dots, \Psi_{f,t}^{i,k}(q), \dots, \Psi_{f,t}^{i,k}(M-1)] \quad (3.6)$$

และ
$$\Psi_{f,t}^{i,k}(q) = \sum_{l=0}^{M-1} w_{f,t}^{i,k}(l) e^{\frac{-j2\pi ql}{M}} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ $\Psi_{f,t}^{i,k}(q)$ คือ FFT ของสัมประสิทธิ์การป้อนข้อมูลไปข้างหน้าสำหรับเสาส่งลำดับที่ i ที่สอดคล้องกับเสารับลำดับที่ q ทางด้านเสาอากาศฝั่งรับในระหว่างการวนซ้ำรอบที่ k ที่เวลา t Ω_t ถูกส่งไปตัวกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าเพื่อทำการคูณกับสัมประสิทธิ์การป้อนข้อมูลไปข้างหน้า $\Psi_{f,t}^{i,k}$ ในเชิงความถี่

โดยเอาต์พุตของวงจรกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าสำหรับการวนรอบที่ k ที่เวลา t สำหรับเสาอากาศลำดับที่ i แสดงด้วย $\bar{F}_t^{i,k}$ โดย

$$\bar{F}_t^{i,k} = \text{diag}(\Omega_t) \cdot \Psi_{f,t}^{i,k} \quad (3.8)$$

ที่ $\text{diag}(\cdot)$ และ $(\cdot)^H$ คือ เส้นทแยงมุมเมทริกซ์และคอนจูเกต ทรานสโพสฟังก์ชัน $\bar{F}_t^{i,k}$ คือ หลังจากการแปลงกลับไปยังเชิงเวลา โดยการอินเวอร์สฟาสฟูเรียร์ทรานฟอร์ม (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) เอาต์พุตการกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าสำหรับเสาอากาศที่ i ระหว่าง การวนซ้ำรอบที่ k ณ เวลา t ให้

$$F_t^{i,k} = \text{ifft}(\bar{F}_t^{i,k}) \quad (3.9)$$

โดยที่

$$F_t^{i,k} = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} \bar{F}_t^{i,k} e^{-\frac{j2\pi l}{M}} \quad (3.10)$$

ซึ่ง $F_t^{i,k}$ เป็นเอาต์พุตในรูปเชิงเวลาของการกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าสำหรับเสาอากาศ i ที่การวนซ้ำ k ณ เวลา t นิยามโดย

$$F_t^{i,k} = I_F \cdot \bar{F}_t^{i,k} \quad (3.11)$$

โดย I_F คือ $I_F = [1 \ 0_{M-1}]$ และ 0_{M-1} คือเวกเตอร์ที่ยาว $(M-1)$ ซึ่งประกอบด้วยศูนย์ทั้งหมด ในการวนรอบรอบแรกนั้นวงจรกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้าจะมีเพียงแค่การลดสัญญาณรบกวนแต่ยังไม่มีการวนการกำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการขาดการคาดคะเนเครื่องหมายจากเอาต์พุตของการถอดรหัสแบบ MAP

หลังจากการวนซ้ำในครั้งแรกแล้ว ตัวกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลย้อนกลับรวมถึงการตรวจสอบกระบวนการ การคาดคะเนเครื่องหมายจากเอาต์พุตของการถอดรหัสการป้อนข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อนกลับถึงการกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลย้อนกลับเพื่อสร้างและยกเลิกสิ่งรบกวนจากเสาอากาศต่างๆ ในกระบวนการตรวจสอบ

การคาดคะเนเครื่องหมายจากเอาต์พุตของการถอดรหัสเป็นการแปลงครั้งแรกไปยังโดเมนเชิงความถี่ที่ใช้ FFT และผ่านการกรองสัญญาณการป้อนข้อมูลย้อนกลับ เอาต์พุตของ FFT กำหนดโดย $\Lambda_t^{i,k}$ ที่เครื่องหมายช่วงเวลา t แสดงโดย

$$\Lambda_t^{i,k} = \text{fft}(\hat{x}_t^{i,k}) \quad (3.12)$$

โดยที่
$$\Lambda_t^{i,k} = [\Lambda_{t,1}^{i,k}, \dots, \Lambda_{t,b}^{i,k}, \dots, \Lambda_{t,N-1}^{i,k}] \quad (3.13)$$

และ
$$\Lambda_{t,b}^{i,k} = \sum_{m=1}^{KN-1} \hat{x}_{t,m}^{i,k} e^{-j2\pi am / KN-1}; \quad a \in (1 \dots N-1) \quad (3.14)$$

ซึ่ง $\hat{x}_{t,p}^{i,k}$ คือ $(N-1) \times 1$ เวกเตอร์ของ Estimated Soft Symbols ที่การวนรอบที่ k จาก MAP Decoder ที่เสาอากาศลำดับที่ i ระหว่างช่วงเวลา t แสดงโดย

$$\hat{x}_{t,p}^{i,k} = (\hat{x}_t^{1,k}, \hat{x}_t^{2,k}, \dots, \hat{x}_t^{i-1,k}, \hat{x}_t^{i+1,k}, \dots, \hat{x}_t^{N,k}) \quad (3.15)$$

ซึ่ง $w_b^{i,k}(t)$ คือ $(N-1) \times 1$ สัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณการป้อนข้อมูลย้อนกลับในรูปแบบของโดเมนเชิงเวลาของเสาอากาศทางด้านฝั่งส่งที่ i ในระหว่างเวลา t แสดงได้โดย

$$w_b^{i,k}(t) = [w_b^{1,k}(t), \dots, w_b^{i-1,k}(t), w_b^{i+1,k}(t), \dots, w_b^{N,k}(t)] \quad (3.16)$$

กำหนดให้ $\Psi_{t,b}^{i,k}$ แทน FFT ของ $w_b^{i,k}(t)$ แสดงโดย

$$\Psi_{t,b}^{i,k} = \text{fft}(w_b^{i,k}(t)) \quad (3.17)$$

ซึ่ง
$$\Psi_{t,b}^{i,k} = [\Psi_{t,b}^{i,k}(0), \dots, \Psi_{t,b}^{i,k}(a), \dots, \Psi_{t,b}^{i,k}(N-2)] \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\Psi_{t,b}^{i,k}(a) = \sum_{m=0}^{N-2} w_{t,b}^{i,k}(m) e^{\frac{-j2\pi am}{N-1}} \quad (3.19)$$

เอาท์พุทของ FFT แสดงโดย $\Lambda_t^{i,k}$ ใช้กับการกรองสัญญาณการป้อนข้อมูลย้อนกลับกับ สัมประสิทธิ์การตอบกลับในเชิงความถี่ $\psi_{t,b}^{i,k}$ ทำการคูณกันในเชิงความถี่ การกรองสัญญาณการป้อนข้อมูลย้อนกลับของสัญญาณเอาท์พุท นิยามโดย $\bar{F}_{t,b}^{i,k}$ ที่เครื่องหมายช่วงเวลา t แสดงโดย

$$\bar{F}_{t,b}^{i,k} = (\text{diag}(\Lambda_t^{i,k}) \cdot \Psi_{t,b}^{i,k}) \quad (3.20)$$

$\bar{F}_{t,b}^{i,k}$ แปลงกลับไปยังโดเมนเชิงความถี่โดย IFFT เอาท์พุทตัวกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลย้อนกลับสำหรับเสาอากาศที่ i ของผู้ใช้ p ในระหว่างการวนซ้ำ k ที่เครื่องหมายช่วงเวลา t แสดงโดย

$$F_{t,b}^{i,k} = \text{iff}(\bar{F}_{t,b}^{i,k}) \quad (3.21)$$

ที่

$$F_{t,b}^{i,k} = \frac{1}{N-1} \sum_{m=0}^{N-2} \bar{F}_{t,b}^{i,k} e^{\frac{-j2\pi m}{KN-1}} \quad (3.22)$$

ซึ่ง $F_{t,b}^{i,k}$ แสดงเอาท์พุทการกรองสัญญาณการป้อนข้อมูลย้อนกลับในเชิงเวลาสำหรับเสาอากาศที่ i ในการวนซ้ำ k ณ เวลา t นิยามโดย

$$\bar{F}_{t,b}^{i,k} = I_B \cdot F_{t,b}^{i,k} \quad (3.23)$$

ที่ $I_B = [1 \ 0_{N-1}]$ และ 0_{N-1} เป็นแถวเวกเตอร์กับ length $N-1$ ประกอบด้วยศูนย์ทั้งหมด ตรวจสอบเอาท์พุทใน (3.23) แสดงให้เห็นถึงสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (Co-channel interference; CCI) สิ่งรบกวนจากเสาอากาศอื่นในระบบการตรวจสอบเครื่องหมายรับที่เอาท์พุทของเครื่องตรวจจับแบบปรับค่าได้ในเชิงเวลาสำหรับเสาอากาศที่ i ในระหว่างการวนซ้ำ k ณ เวลา t นิยามโดย $y_t^{i,k}$ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_i^{i,k} = F_i^{i,k} + F_i^{p,k} \quad (3.24)$$

ที่ $F_i^{i,k}$ และ $F_i^{p,k}$ แสดงให้เห็นถึงการป้อนข้อมูลไปข้างหน้าและเอาต์พุตการกรองสัญญาณการป้อนข้อมูลย้อนกลับในเชิงเวลา ใน (3.11) และ (3.23) ตามลำดับ เวกเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์การป้อนข้อมูลไปข้างหน้า $w_f^{i,k}(t)$ และเวกเตอร์สัมประสิทธิ์การป้อนข้อมูลย้อนกลับ $w_b^{i,k}(t)$ แสดงใน (3.4) และ (3.16) คือการกำหนดอีกครั้งโดยการปรับตัวได้ของ LMS (Least Mean Square) อัลกอริทึม ดังเช่น ค่าผิดพลาดค่าเฉลี่ยยกกำลังสองผิดพลาด ให้โดย

$$\zeta = E[|e(t)|^2] = E[|y_i^{i,k} - x_i^{i,k}|^2] \quad (3.25)$$

ที่ $y_i^{i,k}$ เป็นเครื่องตรวจจับเอาต์พุตอย่างง่ายในเชิงเวลาและสามารถจะแสดงในเชิงเวลาแสดงเป็นพื้นฐานบน LMS อัลกอริทึม

$$y_i^{i,k} = w_f^{i,kH}(t)r_i(t) + w_b^{i,kH}\hat{x}_i^{i,k}(t) \quad (3.26)$$

3.4 กระบวนการลดความซับซ้อน

ในส่วนนี้วิเคราะห์ถึงการลดความซับซ้อนในด้านการคำนวณของกระบวนการพื้นฐานของวงจรกรองแบบปรับค่าได้ในเชิงของเวลา (Time Domain) และในเชิงความถี่ (Frequency Domain) เราได้กำหนดให้ความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณด้านเครื่องรับ ต้องเป็นสัญญาณต่อรหัส (Code) และต่อชั้นสัญญาณ (Layer) เพราะเราต้องทำการเปรียบเทียบความซับซ้อนของฝั่งรับระหว่างในเครื่องรับวนซ้ำแบบปรับค่าได้ในเชิงเวลาและในเชิงความถี่ เราจะทำการพิจารณาความซับซ้อนของตัวรับสัญญาณ (Detector)

ตั้งแต่เริ่มถอดรหัสของทั้งสองแบบโดยการคำนวณเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้โดยที่ให้ N แทนจำนวนสายอากาศทางฝั่งส่ง และให้ M แทนสายอากาศฝั่งรับ ให้ $2M + 1$ เป็นตัวคูณสำหรับการกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า (Feed-Forward filter) และให้ $2N - 1$ เป็นตัวคูณสำหรับการกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback Filter) โดยที่ให้การคำนวณทั้งหมดของวงจรกรองแบบปรับค่า LMS ในเชิงของเวลา คือ $N(2M + 2N)$ โดยให้ N แทนจำนวน

สายอากาศทางด้านฝั่งส่ง M แทนจำนวนสายอากาศทางด้านฝั่งรับ และให้ I เป็นจำนวนรอบในการวนซ้ำ

อีกนัยหนึ่ง ถ้าเป็นวงจรกรองแบบปรับค่า LMS ในเชิงความถี่จะเป็น $\log_2(2M+1)$ เป็นตัวคูณสำหรับการกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า ให้ $\log_2(2(N-1)+1)$ เป็นตัวคูณสำหรับการกรองสัญญาณแบบป้อนข้อมูลย้อนกลับ และให้กระบวนการคำนวณทั้งหมดของวงจรกรองแบบปรับค่าได้ LMS ในเชิงความถี่ คือ $NI(\log_2(2M+1)+\log_2(2N-1))$ โดยให้ N แทนจำนวนสายอากาศทางด้านฝั่งส่ง M แทนจำนวนสายอากาศทางด้านฝั่งรับ และให้ I เป็นจำนวนรอบในการวนซ้ำ การเปรียบเทียบความซับซ้อนของแต่ละตัวรับสัญญาณแสดงได้ในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้ $N=4, M=4, I=10$

Algorithm	Time domain	Frequency domain
Number of multiplications	$NI(2M+2N)$	$NI(\log_2(2M+1)+\log_2(2N-1))$
Computational Complexity	640	239

N = จำนวนสายอากาศทางด้านฝั่งส่ง

M = จำนวนสายอากาศทางด้านฝั่งรับ

I = จำนวนรอบในการวนซ้ำ

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบความซับซ้อนระหว่างวงจรกรองแบบปรับค่าได้ในเชิงของเวลา และวงจรกรองแบบปรับค่าได้ในเชิงความถี่

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการทดลอง จะจำลองระบบในโปรแกรม Matlab เพื่อจะวัดค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้ โดยวัดจากค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate: BER) ในจำนวนเสาอากาศและจำนวนวนซ้ำปรับค่าได้ที่แตกต่างกันไป และทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพกับเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้ในเชิงความถี่

4.1 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบระหว่างการใช้เสาอากาศรับและส่งในจำนวนที่แตกต่างกัน

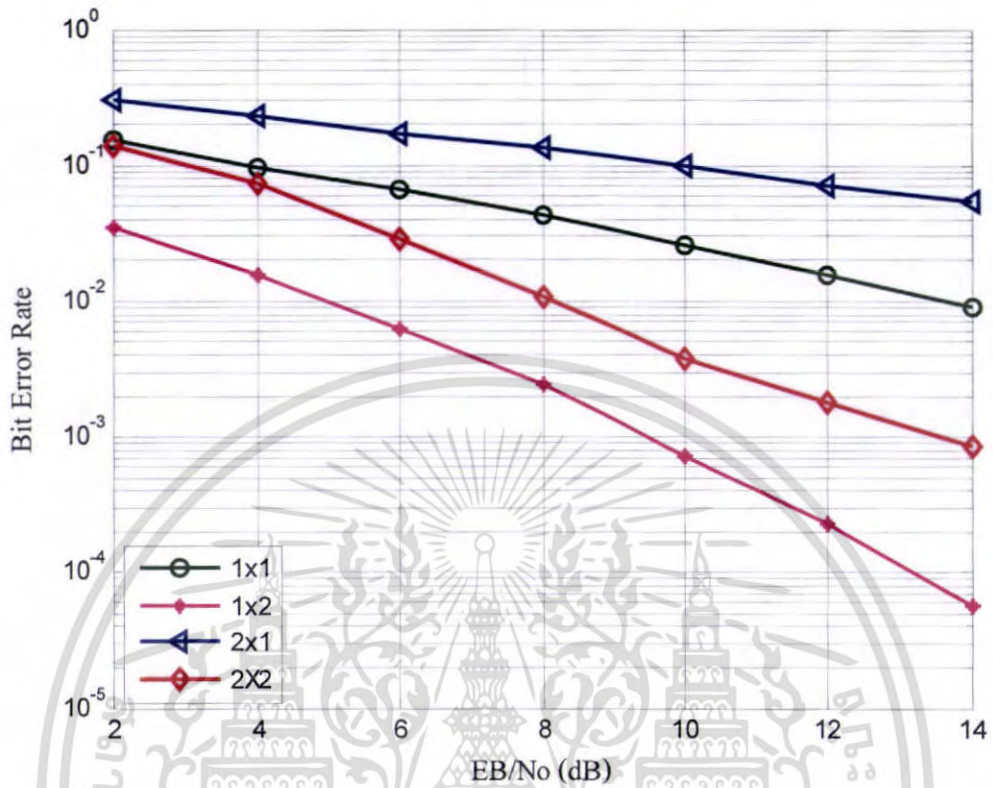
ทำการเปรียบเทียบการส่งข้อมูลเข้าและสัญญาณออกทางเดียว (SISO) การส่งข้อมูลเข้าทางเดียวและออกหลายทาง (SIMO) การส่งข้อมูลเข้าหลายทางออกทางเดียว (MISO) และการส่งข้อมูลหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)

จุดประสงค์การทดลอง

ทดสอบว่าการที่ใช้เสาอากาศการรับและส่งสัญญาณ ในจำนวนเสาอากาศที่แตกต่างกันไป จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบในแต่ละแบบนั้นแตกต่างกันอย่างไร โดยทำการวัดจากค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล

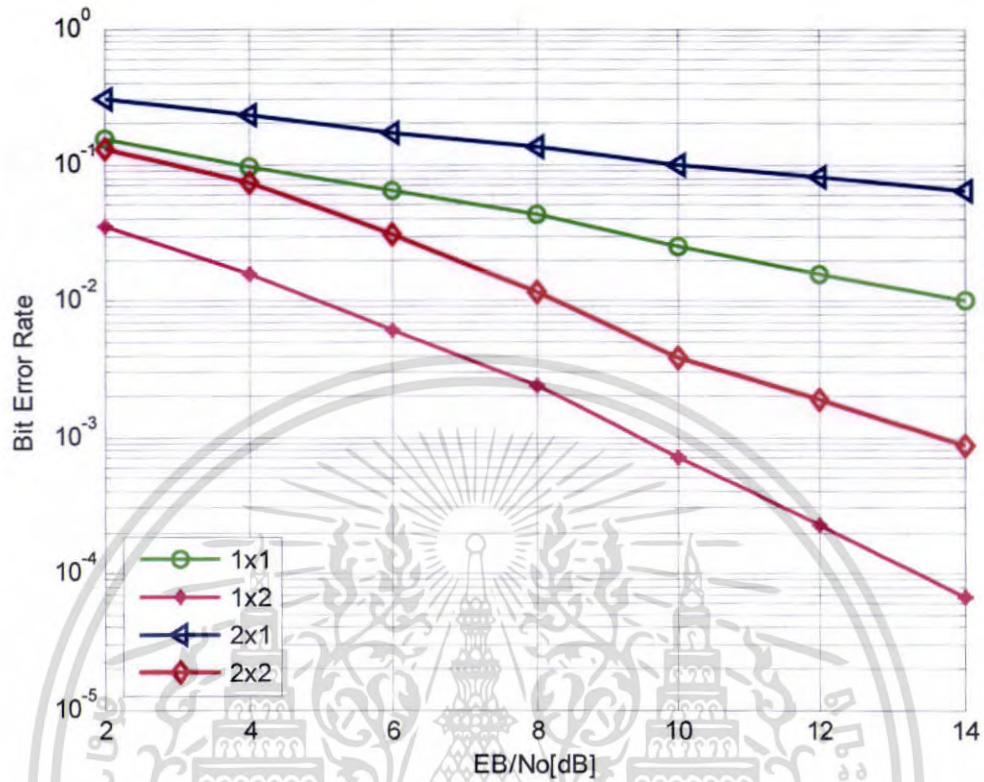
ขั้นตอนการทดลอง

จำลองการทำงานของระบบเครื่องรับ โดยที่ยังไม่มีการทำงานแบบวนซ้ำปรับค่าเพื่อเปรียบเทียบการใช้เสาอากาศในการรับ-ส่งข้อมูลในจำนวนเสาอากาศที่แตกต่างกันออกไป จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) เมื่อเทียบกับอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ในแกนนอน



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบระหว่างจำนวนเสาอากาศที่แตกต่างกันในเครื่องรับเชิงของเวลา (Time Domain Receiver)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบระหว่างจำนวนเสาอากาศที่แตกต่างกันในเชิงของความถี่ (Frequency Domain Receiver)

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่าการส่งสัญญาณที่มีเสาอากาศส่ง 1 รับ 2 นั้นจะมีค่าประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด เนื่องจากการที่มีเสาอากาศในการรับมากขึ้นประสิทธิภาพของระบบก็ดีขึ้น และการรับส่งสัญญาณที่เสาอากาศส่ง 2 รับ 2 นั้นจะมีประสิทธิภาพของระบบแย่ที่สุด เนื่องจากการส่งสัญญาณด้วยเสาอากาศหลายเสา จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (Co-channel interference; CCI) อันเนื่องมาจากสัญญาณเสาอากาศข้างเคียงทำให้มีค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดบิดข้อมูลมาก

4.2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบโดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่

แตกต่างกัน

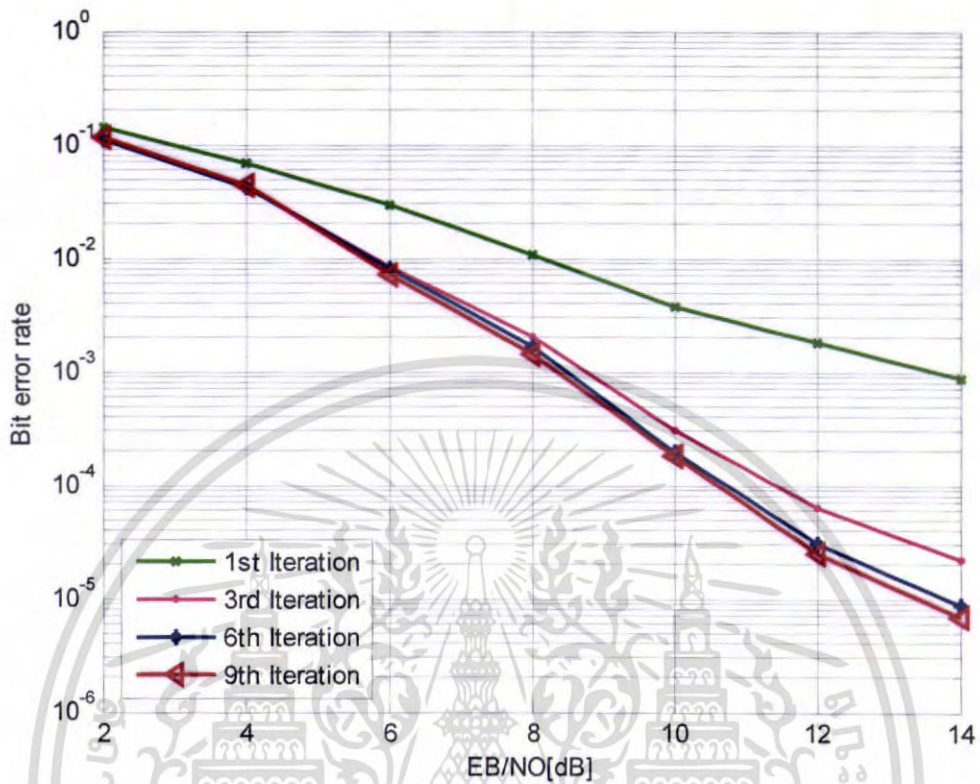
จำลองการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้ โดยทำการกำหนดจำนวนเสาอากาศในการรับสัญญาณและจำนวนเสาอากาศในการส่งให้เท่ากัน แต่มีจำนวนรอบของการวนซ้ำของข้อมูลที่ไม่เท่ากัน

จุดประสงค์การทดลอง

ทดสอบว่าการใช้เครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้ (Adaptive Iterative Detector) ในเชิงความถี่และเชิงของเวลาว่าสามารถลดสัญญาณรบกวนให้มีค่าน้อยลง และการที่ใช้จำนวนรอบในการวนซ้ำปรับค่าได้ในจำนวนวนซ้ำที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพของระบบเป็นไปอย่างไร

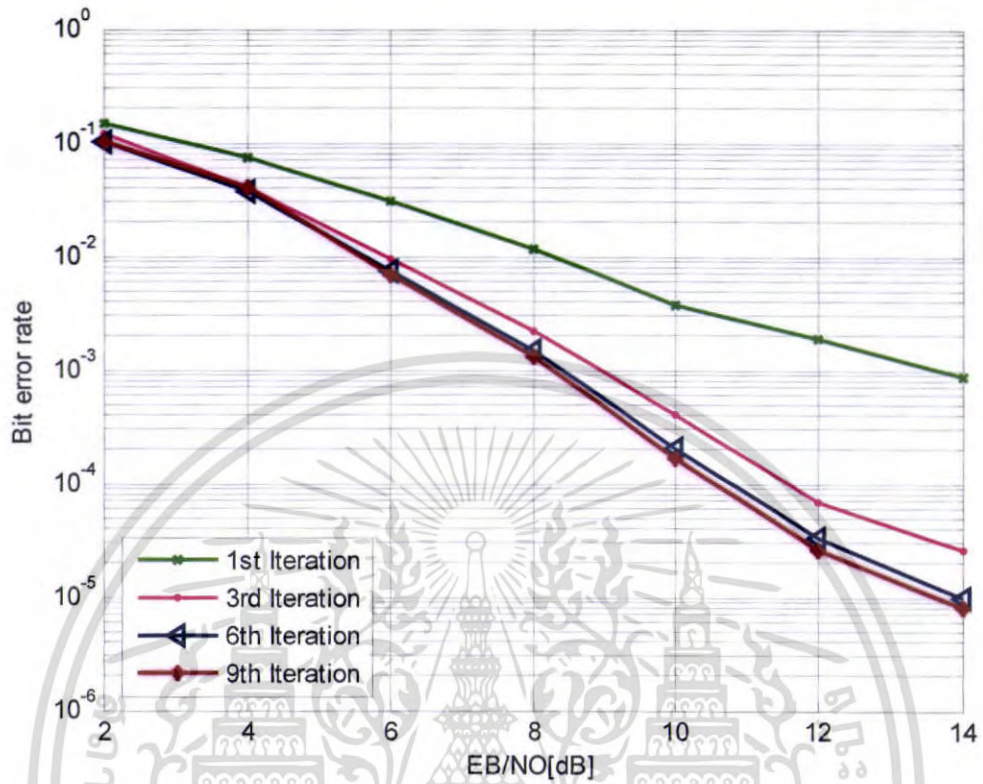
ขั้นตอนการทดลอง

จำลองการทำงานของระบบเครื่องรับ โดยที่มียุทธศาสตร์การทำงานแบบวนซ้ำปรับค่าได้ในเชิงความถี่และเชิงของเวลา โดยกำหนดจำนวนรอบในการวนซ้ำที่แตกต่างกัน จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ เพื่อทำเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเมื่อเทียบกับอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแกนแนวน



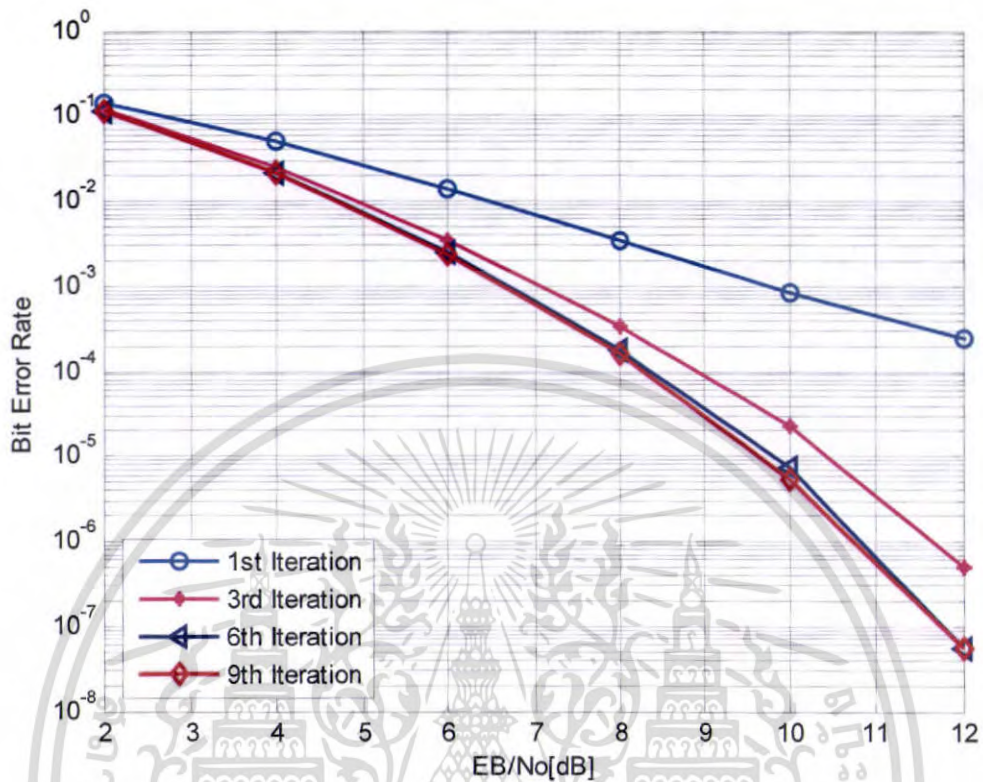
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับแบบวนซ้ำรับค่าได้เชิงของเวลา (Time Domain Adaptive Iterative Receiver) โดยมีเสาอากาศจำนวน 2×2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงความถี่ (Frequency Domain Adaptive Iterative Receiver) โดยมีสายอากาศจำนวน 2×2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงของเวลา (Time Domain Adaptive Iterative) โดยมีสายอากาศจำนวน 3×3

จากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 แสดงถึงผลของการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่าได้ จำนวน 9 รอบ สำหรับการส่งสัญญาณที่ใช้เสาอากาศในการรับส่งสัญญาณ 2 เสาและใช้เสาอากาศในการรับส่ง 3 เสาตามลำดับ จากผลการทดลอง จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่าทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าลดลง ยิ่งการใช้จำนวนรอบในการวนซ้ำมากยิ่งขึ้นทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลยิ่งลดลง ทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น

4.3 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้ระหว่างเชิงของเวลากับเชิงความถี่

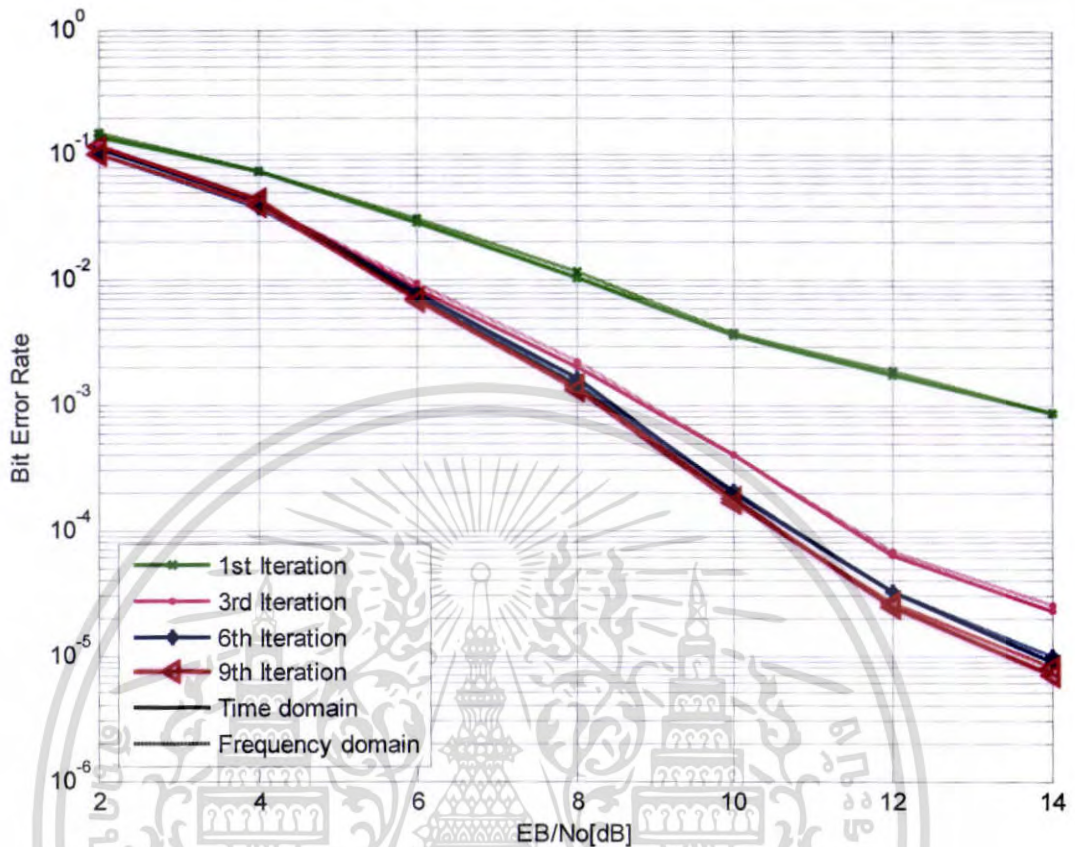
จำลองการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงของเวลา และเชิงของความถี่ โดยทำการกำหนดจำนวนเสาอากาศในการรับสัญญาณและจำนวนเสาอากาศในการส่งให้เท่ากัน และมีจำนวนรอบของการวนซ้ำของข้อมูลที่เท่ากัน

จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระหว่างการใช้เครื่องรับเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงของเวลา และเชิงของความถี่

ขั้นตอนการทดลอง

จำลองการทำงานของระบบเครื่องรับ โดยที่มีการทำงานแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงของเวลากับเชิงความถี่ เพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ โดยกำหนดจำนวนเสาอากาศที่ทำการรับและส่งให้เท่ากัน และจำนวนในการวนซ้ำที่เท่ากัน จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเมื่อเทียบกับอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแกนนอน



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับวนซ้ำปรับค่าได้เชิงของเวลากับเชิงความถี่ โดยมีสายอากาศจำนวน 2×2

จากรูปที่ 4.6 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ โดยทำการกำหนดจำนวนเสาอากาศรับและส่ง 2 เสา และจำนวนรอบในการวนซ้ำ 9 รอบ จากรูปจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของระบบจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 แบบนั้นมีค่าประสิทธิภาพของระบบที่ใกล้เคียงกันแต่เครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงความถี่นั้นจะมีความซับซ้อนของระบบน้อยกว่าเครื่องรับในเชิงของเวลามาก

บทที่ 5 สรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

การส่งสัญญาณที่มีเสาอากาศมากกว่าหนึ่งเสาจะทำให้มีค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (Bit Error Rate) นั้นมีค่ามากกว่าการส่งสัญญาณโดยใช้เสาอากาศเพียงเสาเดียว เนื่องจากการส่งสัญญาณด้วยเสาอากาศหลายเสา จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (Co-channel interference; CCI) อันเนื่องมาจากสัญญาณเสาอากาศข้างเคียง จึงได้ทำการออกแบบเครื่องรับสัญญาณที่มีการวนซ้ำปรับค่าได้เพื่อจะขจัดปัญหานี้ไป เมื่อทำการทดลองโดยใช้เครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า โดยทำการเปรียบเทียบกับจำนวนรอบที่ทำการวนซ้ำ จะเห็นได้ว่าการป้อนข้อมูลวนซ้ำมากรอบเท่าไร ผลที่ได้ทำให้มีค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ทั้งยังเป็นการแก้ปัญหาของการถูกจำกัดด้วยสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (Co-Channel Interference; CCI) อันเนื่องมาจากสัญญาณเสาอากาศข้างเคียง แต่ก็ยังมีข้อเสียคือจะมีความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณของระบบมาก จึงออกแบบให้เครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงเวลา จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงเวลา กับเชิงความถี่นั้นมีค่าประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน แต่การใช้เครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่าได้เชิงความถี่นั้นจะทำให้ความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณของระบบนั้นมีค่าน้อยลงมากเมื่อเทียบกับเครื่องรับวนซ้ำปรับค่าได้เชิงเวลา ซึ่งวิธีนี้ทำให้ความซับซ้อนของระบบมีค่าน้อยลง

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค

การที่จะทำการจำลอง (Simulate) การทำงานของระบบนั้น จะต้องใช้จำนวนเฟรมเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง และการกำหนดสมมุติฐานที่ต่างกันทำให้ใช้ระยะเวลาในการรันโปรแกรมที่นาน เป็นผลทำให้ดำเนินงานเป็นไปอย่างล่าช้า อีกทั้งถ้าหากการกำหนดสมมุติฐานต่างๆ ในการจำลองระบบเกิดความผิดพลาดจะยิ่งทำให้การดำเนินงานล่าช้ามากยิ่งขึ้น เพราะต้องทำการเก็บข้อมูลใหม่อีกครั้งเพื่อความถูกต้องของข้อมูล

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ

ถึงแม้ว่าระบบที่ออกแบบมานี้จะสามารถลดค่าความผิดพลาดของข้อมูล และความซับซ้อนของระบบลดลง แต่ก็ยังใช้เวลาในการประมวลผลนานมาก ดังนั้นในการพัฒนาต่อไปควรจะ

ทำการศึกษ้อัลกอริทึมใหม่ๆ ในการออกแบบหรือเลือกนำคอมพิวเตอร์ตัวอื่นมาใช้ในการจำลองระบบที่สามารถทำให้การประมวลผลที่เร็วขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Mohinder Lankiraman.2004.**Space-time and MIMO systems**.Boston.Artech House

Kamil Sh.Ziganairov.2004.**Theory of code division multiple access communication**.
Piscataway,NJ.IEEE Press

Savo Glisic.2004.**Advanced wireless communication :4G Technologies**.Chichester.John Wiley

Branka Vucetic and Jinhong Yuan.2003.**Space-Time Coding**.Chichester : John Wiley

Shinsuke Hara and Ramjee Prasad.2003.**Multicarrier techniques for 4G mobile communication**.Boston.Artech House

Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar and Dhananjay Gore.2003.**Introduction to space-time wireless communications**. Cambridge.Cambridge University Press

Sergio Verdu.1998.**Multuser detection**.Cambridge.Cambridge University Press