

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โครงสร้างตัวรับสัญญาณแบบสเปซไทม์ชนิดปรับค่าได้สำหรับระบบดีเอสซีดีเอ็มเอ

Adaptive Combined Space-Time Structure for DS-CDMA

โดย

นาย จินตวิทย์ อุเทนพิทักษ์

นาย สุปรีย์พงษ์ ศรีเสาวชาติ

รฟ.
๗๕๕๑๑
๒๕๕๑

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 72767

วันเดือนปี..... 2.2.ค.ย. 2550

b. 117 12.12b

i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADAPTIVE COMBINED SPACE-TIME STRUCTURE FOR DS-CDMA

BY

MR. JINTAWEE UTENPITAK

MR. SUPREPONG SRISAOVAJATI

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

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ โครงสร้างตัวรับสัญญาณแบบสเปซไทม์ชนิดปรับค่าได้สำหรับระบบดีเอสซีดีเอ็มเอ

ชื่อนักศึกษา นายจินตวีร์ อุเทนพิทักษ์ รหัสนักศึกษา 46010113
นายสุปรีย์พงษ์ ศรีเสาวชาติ รหัสนักศึกษา 46010855

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช
ดร. จักรี ทิมภาคย์วิศิษฐ์

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ


ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2549

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

(รศ. ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ดร. จักรี ทิมภาคย์วิศิษฐ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|--------------------------|---|-----------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | โครงสร้างตัวรับสัญญาณแบบสเปซไทม์ชนิดปรับค่าได้สำหรับระบบดีเอสซีดีเอ็มเอ | |
| ชื่อนักศึกษา | นายจินตวีร์ อุเทนพิทักษ์ | รหัสนักศึกษา 46010113 |
| | นายสุปรีย์พงษ์ ศรีเสาวชาติ | รหัสนักศึกษา 46010855 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ. ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช ดร. จักรี ทิมภาคย์วิศิษฎ์ | |
| ระดับการศึกษา | ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ | |
| ภาควิชา | วิศวกรรมสารสนเทศ | |
| ปีการศึกษา | 2549 | |

บทคัดย่อ

ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายอนาคตในยุคที่ 4 ถูกคาดหวังว่าจะสามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลคุณภาพสูงและการส่งผ่านข้อมูลมัลติมีเดียด้วยอัตราความเร็วสูงมากกว่าระบบสื่อสารไร้สายระบบเก่าที่มุ่งเน้นการส่งผ่านข้อมูลเสียงเพียงอย่างเดียว เพื่อที่จะพัฒนานวัตกรรมดังกล่าวสู่ความเป็นจริง การเพิ่มความจุช่องสัญญาณความเร็วสูงบนทรัพยากรความถี่และกำลังการส่งที่จำกัดเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ทำนายสำหรับความต้องการดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ถูกจำกัดด้วยสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) อันเนื่องมาจากสัญญาณข้างเคียงและสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้งานหลายคน (MAI)

สำหรับ โปรเจกต์นี้ ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออกแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative MIMO) จะถูกศึกษาบนพื้นฐานของการผสมการตรวจจับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่าและอัลกอริทึมการถอดรหัสเพื่อการขจัดสัญญาณรบกวนทั้งจากช่องสัญญาณร่วมและจากผู้ใช้หลายคน ออกจากระบบ โดยใช้โปรแกรมเมทแลบ (MATLAB) ในการจำลองประสิทธิภาพการทำงาน

Thesis Title Adaptive Combined Space-Time Structure for DS-CDMA

Student Mr. Jintawee Utenpitak ID. 46010113
Mr. Suprepong Srisaovajati ID. 46010855

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

Graduate Level Bachelor Degree of Information Engineering

Department Information Engineering

Academic Year 2006

Abstract

The future 4th generation mobile communication systems are expected to provide high quality and high data rate multimedia packet transmission rather than voice-oriented legacy wireless systems. To achieve the innovative features into reality, capability of high spectral efficiency over limited frequency resource with limited transmission power is required. The MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) system is a challenging technique to provide such a requirement.

However, the performance of MIMO system is limited by the co-channel interference (CCI) due to the adjacent antennas signal and multiple access interface (MAI).

In this project, the adaptive iterative MIMO system is investigated base on the combination of an adaptive iterative detection and decoding algorithm to suppress and cancel both the CCI and MAI in the system. MATLAB program is employed to simulate the system performance in this project.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงมีอาจสำเร็จได้ ถ้าปราศจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุกๆท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือ แนะนำในทุกๆด้าน

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช และ ดร. จักรกริ ทีฆภาคย์วิศิษฏ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ทั้งสองท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งเอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆในการจัดทำโครงการ จึงทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ได้ให้คำแนะนำ แบ่งปันข้อมูล และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจาก โครงการนี้ ทางผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

นายจินตวีร์ อุเทนพิทักษ์
นายสุปรีย์พงษ์ ศรีเสาวชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | |
|--|----------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบซีดีเอ็มเอ (CDMA) | 4 |
| 2.1 เทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทาง (Multiple Access Technique) | 4 |
| 2.1.1 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (FDMA) | 4 |
| 2.1.2 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (TDMA) | 4 |
| 2.1.3 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (CDMA) | 5 |
| 2.2 ซีดีเอ็มเอแบบการจับลำดับการเข้าถึงโดยตรง (DS-SS) | 6 |
| 2.3 รหัสแผ่ (Spreading Code) | 9 |
| 2.3.1 Orthogonal Code | 9 |
| 2.3.2 Pseudorandom Noise-Sequence (PN Sequence) | 9 |
| 2.4 Maximal-Length Sequence (M-Sequence) | 10 |
| 2.5 รหัสโกลด์ (Gold Code) | 12 |
| 2.6 รหัสคอนโวลิวชัน (Convolutional Code) | 13 |
| 2.6.1 แผนภาพการเปลี่ยนสถานะ (State Diagram) | 16 |
| 2.7 อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (MAP Decoding Algorithm) | 17 |
| 2.8 การวางสลับ (Interleaving) | 21 |
| 2.8.1 การวางสลับข้อมูลแบบบล็อก (Block Interleaving) | 21 |
| 2.8.2 การวางสลับข้อมูลแบบสุ่ม (Random Interleaving) | 21 |
| 2.9 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ DS-SS | 22 |
| 2.9.1 สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) | 22 |
| 2.9.2 สัญญาณรบกวนแถบแคบ | 23 |
| 2.9.3 สัญญาณรบกวนแถบกว้าง | 23 |
| 2.10 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องรับในระบบ DS-SS | 24 |
| 2.10.1 สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่นในระบบเดียวกัน (MAI) | 24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 2.10.2 | ปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-Far Effect) | 24 |
| 2.10.3 | เฟดดิ้ง (Fading) | 24 |
| 2.11 | เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายคน (Multiuser Detection) | 24 |
| 2.11.1 | เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Receiver) | 27 |
| 2.11.2 | เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงมา (Sub-optimal Receiver) | 27 |
| 2.12 | วงจรกรองแบบปรับค่าได้ (Adaptive detector) | 28 |
| 2.13 | ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) | 30 |
| 2.14 | เทคนิคการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity Techniques) | 31 |
| 2.14.1 | การทำไควเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity) | 32 |
| 2.14.2 | การทำไควเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) | 33 |
| 2.14.3 | การทำสเปซไควเวอร์ซิตี (Space Diversity) | 34 |
| 2.15 | การรวมไควเวอร์ซิตี (Diversity Combining) | 34 |
| 2.15.1 | ซีเล็กทีฟคอมไบนิง (Selective Combining) | 35 |
| 2.15.2 | สวิตช์คอมไบนิง (Switched Combining) | 36 |
| 2.15.3 | อีควอลเกนคอมไบนิง (Equal-Gain Combining, EGC) | 37 |
| 2.15.4 | แมกซ์ิมัลดเรโซคอมไบนิง (Maximal ratio combining, MCR) | 37 |
| บทที่ 3 | การออกแบบโครงงาน | 39 |
| 3.1 | การออกแบบภาครับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative Detector) | 41 |
| 3.2 | การออกแบบภาคส่งสัญญาณ (Transmitter) | 46 |
| 3.2.1 | ภาคส่งสัญญาณขาลง (Downlink) | 46 |
| 3.2.2 | ภาคส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) | 50 |
| บทที่ 4 | การทดลอง | 52 |
| 4.1 | การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) | 52 |
| 4.2 | การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของการวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) | 53 |
| บทที่ 5 | สรุปผลการทดลอง | 55 |
| 5.1 | สรุปผลการทดลองที่ 1 | 55 |
| 5.2 | สรุปผลการทดลองที่ 2 | 56 |
| บรรณานุกรม | | 59 |

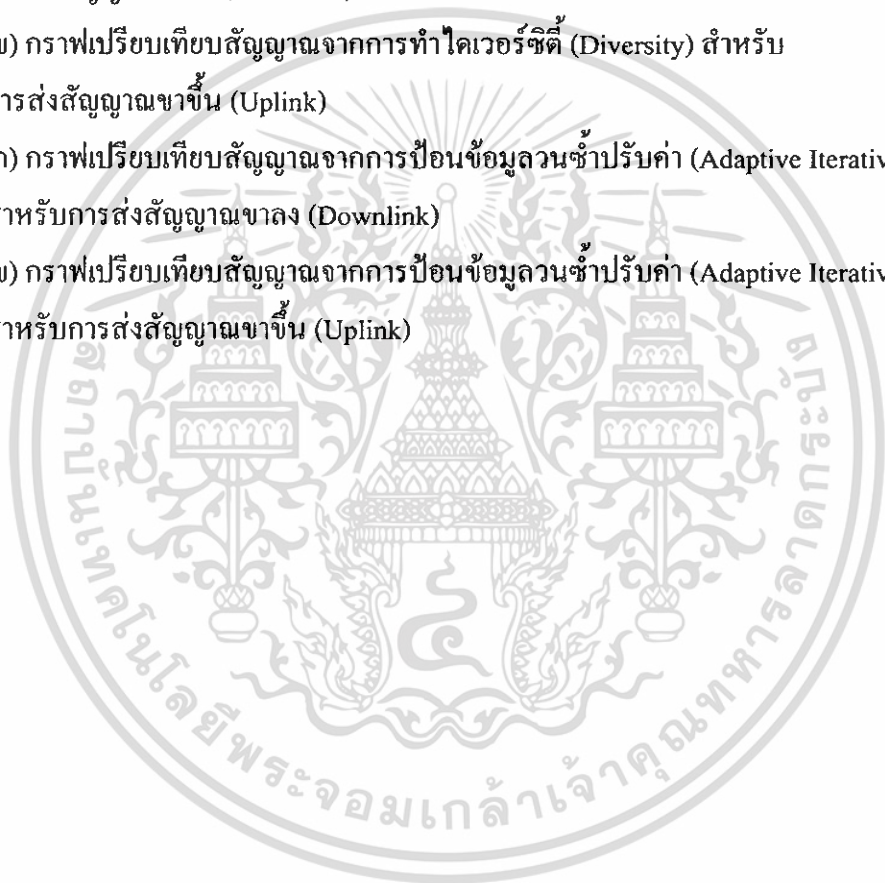
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| | |
|---|----|
| รูปที่ 1.1 การสื่อสารแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) | 1 |
| รูปที่ 2.1 แนวคิดแบบ FDMA | 4 |
| รูปที่ 2.2 แนวคิดแบบ TDMA | 5 |
| รูปที่ 2.3 แนวคิดแบบ CDMA | 5 |
| รูปที่ 2.4 แผนผังการเข้ารหัสสัญญาณและการมอดูเลต | 7 |
| รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเข้ารหัสสัญญาณและการมอดูเลต | 7 |
| รูปที่ 2.6 กระบวนการรับส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้รับ | 8 |
| รูปที่ 2.7 ชิฟท์รีจิสเตอร์สร้างรหัสข้อมูล M-Length | 10 |
| รูปที่ 2.8 โครงสร้างทั่วไปของวงจรสร้างรหัสโกลด์ | 12 |
| รูปที่ 2.9 วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน (rate $\frac{1}{2}$ K=3) | 13 |
| รูปที่ 2.10 ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสคอนโวลูชัน | 15 |
| รูปที่ 2.11 แผนภาพสถานะ (State Diagram) ของวงจรเข้ารหัสที่มี rate=1/2, K=3 | 16 |
| รูปที่ 2.12 แผนภาพการวนลูปไปข้างหน้าและไปข้างหลัง | 20 |
| รูปที่ 2.13 การวางสลับข้อมูล (ก) Block Interleaving, (ข) Random Interleaving | 22 |
| รูปที่ 2.14 ลำดับชั้นของเทคนิคเครื่องรับสัญญาณ CDMA | 26 |
| รูปที่ 2.15 โครงสร้างการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ | 28 |
| รูปที่ 2.16 การรับส่งสัญญาณแบบ MIMO | 30 |
| รูปที่ 2.17 สัญญาณที่ได้จากการทำโคเวอริจี้ และการรวมสัญญาณที่มาจากแต่ละเส้นทาง | 32 |
| รูปที่ 2.18 การวางเสาอากาศในการส่งสัญญาณ 2 เสาให้มีความห่างเป็นระยะ d | 34 |
| รูปที่ 2.19 โครงสร้างการทำงานของซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง (Selective Combining) | 35 |
| รูปที่ 2.20 โครงสร้างการทำงานของสวิตซ์คอมไบนิ่ง (Switched Combining) | 36 |
| รูปที่ 2.21 โครงสร้างการทำงานของแมกซ์ิมัลเร โชมไบนิ่ง (Maximal ratio combining, MCR) | 38 |
| รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโครงการ | 40 |
| รูปที่ 3.2 การตรวจจับสัญญาณของ 1 ผู้ใช้งานที่มีการป้อนข้อมูลย้อนกลับจากผู้ใช้งานอื่น | 42 |
| รูปที่ 3.3 การตรวจจับสัญญาณของ 1 ผู้ใช้งานที่มีการป้อนข้อมูลย้อนกลับจากเสาอากาศอื่น | 44 |
| รูปที่ 3.4 โครงสร้างการทำงานของฝั่งส่งข้อมูลโดยใช้ 1 เสาอากาศในการส่ง | 46 |
| รูปที่ 3.5 โครงสร้างการทำงานของภาคส่งสัญญาณสำหรับขาลง (Downlink) | 47 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.6 โครงสร้างการทำงานของภาครับส่งสัญญาณขาลง (Downlink) สำหรับระบบ หลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) | 49 |
| รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของภาคส่งสัญญาณสำหรับขาขึ้น (Uplink) | 50 |
| รูปที่ 3.8 โครงสร้างการทำงานของภาครับส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) สำหรับระบบ หลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) | 51 |
| รูปที่ 5.1 (ก) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) สำหรับ การส่งสัญญาณขาลง (Downlink) | 55 |
| รูปที่ 5.1 (ข) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) สำหรับ การส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) | 56 |
| รูปที่ 5.2 (ก) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) สำหรับการส่งสัญญาณขาลง (Downlink) | 57 |
| รูปที่ 5.2 (ข) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) สำหรับการส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) | 58 |



บทที่ 1 บทนำ

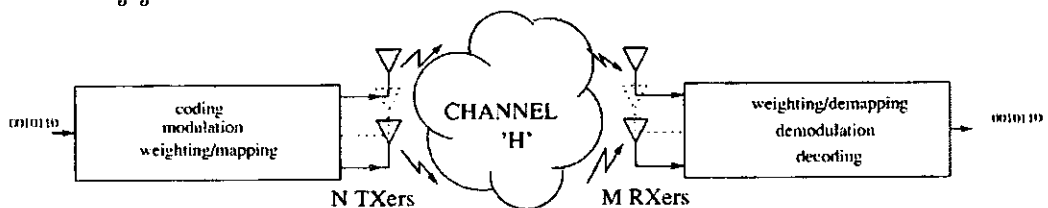
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ไร้สายอนาคตในยุคที่ 4 ถูกคาดหวังว่าจะสามารถให้บริการการสื่อสารข้อมูลคุณภาพสูงและการส่งผ่านข้อมูลมัลติมีเดียด้วยอัตราความเร็วสูงมากกว่าระบบสื่อสารไร้สายระบบเก่าที่มุ่งเน้นการส่งผ่านข้อมูลเสียงเพียงอย่างเดียว เพื่อที่จะพัฒนานวัตกรรมดังกล่าวสู่ความเป็นจริง การเพิ่มความจุช่องสัญญาณความเร็วสูงบนทรัพยากรความถี่และกำลังการส่งที่จำกัดเป็นสิ่งจำเป็น และระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ทำนายสำหรับความต้องการดังกล่าว

เนื่องจากระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) เป็นระบบที่มีการใช้งานเสาอากาศหลายตัวในการรับส่งข้อมูลเพื่อเพิ่มความจุให้กับระบบ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนอกจากจะมาจากสภาพแวดล้อมและการรบกวนจากผู้ใช้รายอื่นเหมือนกับระบบซีดีเอ็มเอ (CDMA) ทั่วไปแล้ว ยังมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเสาอากาศอื่นที่ใช้ในการส่งด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) จึงถูกจำกัดด้วยสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) อันเนื่องมาจากสัญญาณเสาอากาศข้างเคียงและสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้หลายราย (MAI)

เพื่อที่จะทำให้ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ทำงานได้อย่างเต็มที่เราจึงต้องพัฒนาภาครับให้สามารถกรองสัญญาณได้ดีขึ้น เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) และสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้หลายคน (MAI) ทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจก็คือ การทำให้เครื่องรับสัญญาณสามารถปรับค่าตัวแปรภายในได้ โดยการปรับค่านี้จะเป็นการนำข้อมูลของผู้ใช้คนอื่นหรือเสาอากาศอื่นที่ไม่ใช่เสาอากาศที่เรากำลังพิจารณาไปปรับค่าเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกไป

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบภาครับที่สามารถปรับค่าได้ดังที่กล่าวมา และได้ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) เพื่อแสดงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการลดลงของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 1.1 การสื่อสารแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาเทคนิคและข้อจำกัดของการพัฒนาการสื่อสารให้มีความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น โดยใช้วิธีการสื่อสารแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)
- 2) เพื่อศึกษาเทคนิคและวิธีการที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้การสื่อสารแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)
- 3) เพื่อออกแบบภาครับของการสื่อสารระบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกหลายทางแบบมีการป้อนข้อมูลวนซ้ำ (Iterative MIMO) ที่มีการใช้ตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive Detector) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)
- 4) เพื่อศึกษาผลและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหลังจากการใช้ตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้สำหรับสัญญาณขาลง (Downlink) หรือจากสถานีฐานสู่เครื่องลูกข่าย
- 5) เพื่อศึกษาผลและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหลังจากการใช้ตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้สำหรับสัญญาณขาขึ้น (Uplink) หรือจากเครื่องลูกข่ายสู่สถานีฐาน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบซีดีเอ็มเอ (CDMA) ระบบการเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access) รหัสแผ่ (Spreading Code) สัญญาณรบกวนแบบต่างๆที่มีผลต่อระบบและเครื่องรับสัญญาณแบบต่างๆ โดยสังเขป เพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้น จากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบเครื่องรับแบบปรับค่าได้ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มความจุของการรองรับผู้ใช้งาน (Capacity) และช่วยลดอัตราความผิดพลาดบิต (BER) จากนั้นจะแสดงผลของการทดลองโดยจำลองจากโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) ทั้งในส่วนของการรับสัญญาณขาลง (Downlink) และเครื่องรับสัญญาณขาขึ้น (Uplink) เพื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้ว่าช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นเพียงใด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

- 1) ศึกษาโครงสร้างของเครื่องรับสัญญาณแบบต่างๆ
- 2) ศึกษาโครงสร้างของเครื่องส่งสัญญาณที่รองรับการทำงานระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ได้
- 3) ศึกษาเรื่องเครื่องรับสำหรับผู้ใช้งานหลายรายว่ามีกลไกการทำงานอย่างไร
- 4) ศึกษาการใช้งานโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) เพื่อทำการจำลองรูปแบบสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ทดลองออกแบบเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้สำหรับสัญญาณขาลง (Downlink) จากนั้นทำการจำลอง (Simulate) การรับส่งสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น

6) ทดลองออกแบบเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้สำหรับสัญญาณขาขึ้น (Uplink) จากนั้นทำการจำลอง (Simulate) การรับส่งสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น

7) เปรียบเทียบผลการจำลอง (Simulate) ของเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ทั้งสัญญาณขาลงและสัญญาณขาขึ้นว่ามีความแตกต่างอย่างไร

8) นำผลที่ได้จากการจำลอง (Simulate) มาทำการวิเคราะห์เครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดอัตราการผิดพลาดของข้อมูลมากน้อยเพียงไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

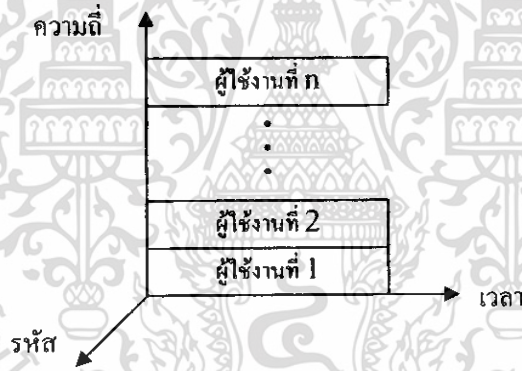
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบซีดีเอ็มเอ (CDMA)

2.1 เทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทาง (Multiple Access Technique)

เทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบหลายทางสำหรับการสื่อสารไร้สายได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อบรรลุนความต้องการความจุของระบบที่สูงขึ้น เทคนิคพื้นฐาน 3 แบบที่ใช้กันในปัจจุบันมีดังนี้

2.1.1 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (FDMA)

เป็นเทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบอนาล็อก และกำหนดให้ผู้ใช้งานรายหนึ่งครอบครองช่องสื่อสารวิทยุหนึ่งช่องตลอดช่วงเวลาของการใช้งาน เป็นเทคนิคที่นิยมใช้งานในระบบวิทยุสื่อสาร และควมเทียม รูปที่ 2.1 แสดงแนวคิดแบบ FDMA

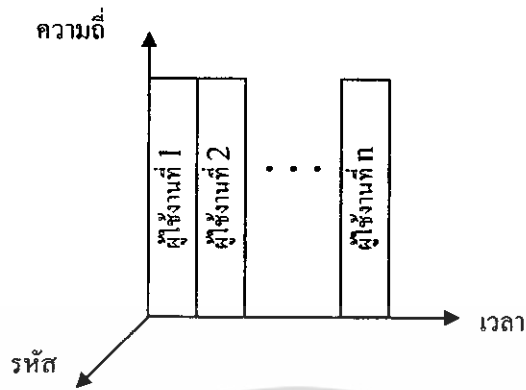


รูปที่ 2.1 แนวคิดแบบ FDMA

2.1.2 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (TDMA)

เป็นเทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบดิจิทัลที่อนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถใช้ช่วงความถี่เดียวกันในการสื่อสาร โดยการแบ่งช่วงเวลาการใช้งานให้ผู้ใช้งานแต่ละราย ซึ่งผู้ใช้บริการสามารถใช้ช่องสัญญาณเต็มในช่วงเวลาที่ได้รับการจัดสรร นอกช่วงเวลาก็เป็นสิทธิการใช้งานของผู้ใช้รายอื่น เทคนิคนี้เป็นที่นิยมสำหรับการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบ GSM รูปที่ 2.2 แสดงแนวคิดแบบ TDMA

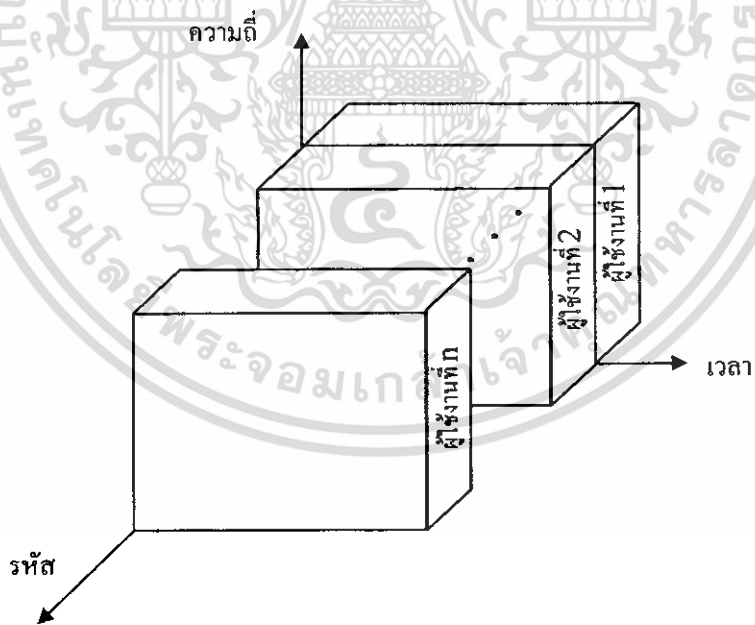
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แนวคิดแบบ TDMA

2.1.3 เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (CDMA)

เป็นเทคนิคการเข้าถึงช่องสัญญาณที่อนุญาตให้ผู้ใช้งานทุกรายสามารถใช้งานความถี่เดียวกันพร้อมกันในเวลาเดียวกัน โดยการแยกสัญญาณของผู้ใช้งานแต่ละรายออกด้วยรหัสเฉพาะชุดหนึ่งสำหรับผู้ใช้แต่ละราย รูปที่ 2.3 แสดงแนวคิดแบบ CDMA



รูปที่ 2.3 แนวคิดแบบ CDMA

เนื่องจากการเข้าถึงข้อมูลหลายทางโดยการแบ่งรหัสนั้น ความกว้างของแถบสัญญาณรหัสมีค่ามากกว่าความกว้างแถบของสัญญาณข้อมูลมากๆ เป็นเหตุให้กระบวนการเข้ารหัสเกิดการแผ่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของสเปกตรัมของสัญญาณ ซึ่งทำให้สัญญาณสเปกตรัมแผ่มีความหนาแน่นของกำลังงานลดลง เราสามารถคำนวณอัตราขยายการประมวลผล (Processing Gain: G_p) ของระบบสเปกตรัมแผ่โดยหาค่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างแถบของสัญญาณสเปกตรัมแผ่ต่อความกว้างของสัญญาณข้อมูลดั้งเดิมการ

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

เมื่อ B_t เป็นความกว้างแถบของสัญญาณสเปกตรัม
 B_i เป็นความกว้างแถบของสัญญาณข้อมูล

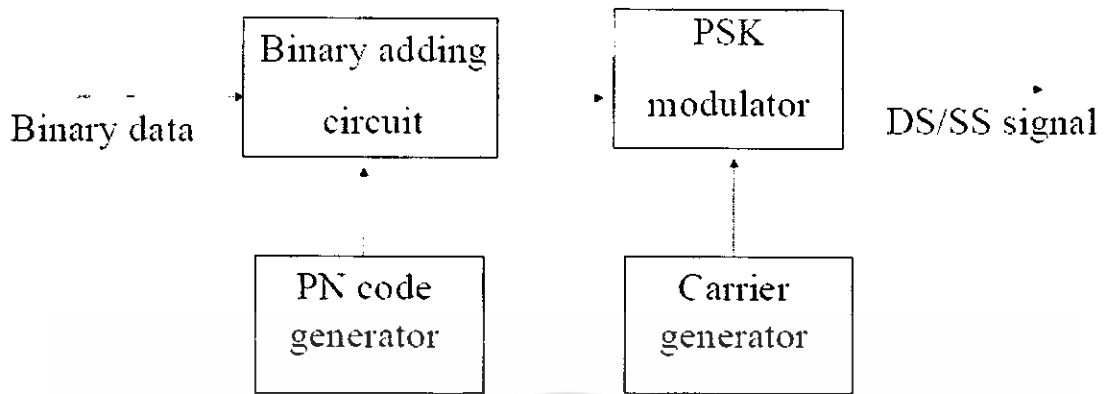
คุณสมบัติที่สำคัญของสเปกตรัมแผ่มีดังนี้

- 1) ความสามารถในการป้องกันสัญญาณแทรกแซงจากผู้อื่น (Resistance to jamming)
- 2) ความสามารถในการป้องกันการถูกดักจับข้อมูล (Resistance to eavesdropping)
- 3) ความสามารถในการป้องกันการอ่อนกำลังของสัญญาณ (Resistance to fading)
- 4) ความสามารถในการป้องกันสัญญาณแทรกสอดแบบหลายเส้นทาง (Resistance to Multipath Interference)

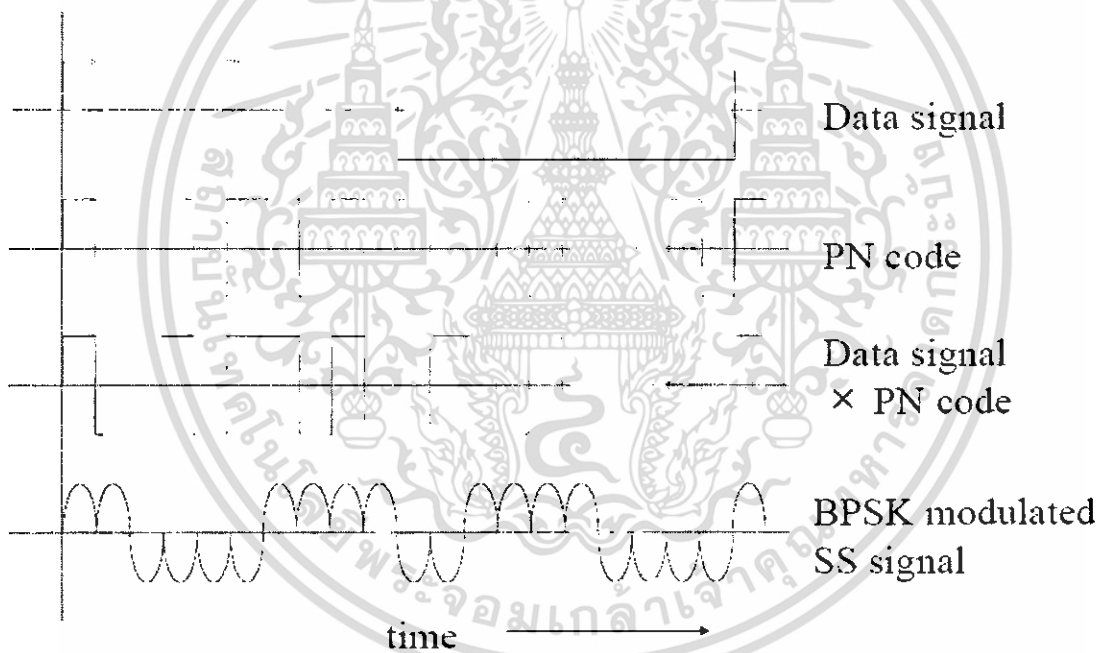
2.2 ซีดีเอ็มเอแบบการจับลำดับการเข้าถึงโดยตรง (DS-SS-SSMA)

ระบบ CDMA ที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบันคือ DS-SS-SSMA ย่อมาจาก Direct-sequence spread spectrum CDMA วิธีการคือสัญญาณข้อมูลจะถูกมอดูเลตโดยตรงกับสัญญาณรหัสดิจิทัล สัญญาณข้อมูลจะถูกคูณกับสัญญาณรหัสโดยตรงและนำสัญญาณที่ได้มามอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห์แถบกว้าง และผลจากการคูณสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรหัสโดยตรงจึงเป็นที่มาของวิธีการที่เรียกว่า การจับลำดับการเข้าถึง โดยตรง พิจารณาจากรูปที่ 2.4 สัญญาณข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายจะถูกคูณกับรหัสสัญญาณ PN จากเครื่องกำเนิดรหัสซึ่งได้ค่าที่แตกต่างกันทำให้เกิดการแผ่สเปกตรัมของสัญญาณ และทำให้อัตราบิตสูงขึ้น เราเรียกอัตราบิตหลังการทำสเปกตรัมแผ่แล้วนี้ว่าอัตราชิป (Chip Rate) จากนั้นก็จะนำสัญญาณที่ได้ไปทำการมอดูเลตกับคลื่นพาห์ความถี่สูงจากเครื่องสร้างคลื่นพาห์ (Carrier generator) โดยวิธี BPSK (Binary Phase Shift Keying) แล้วจึงส่งข้อมูลออกไปทางเสาอากาศ สำหรับในฝั่งผู้รับ เมื่อได้รับข้อมูลทั้งหมดก็ทำการดีมอดูเลตแล้วคูณสัญญาณที่ได้ด้วยรหัส PN ชุดที่ตรงกับข้อมูลที่ต้องการ ก็จะได้ข้อมูลออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แผนผังการเข้ารหัสสัญญาณและการมอดูเลต

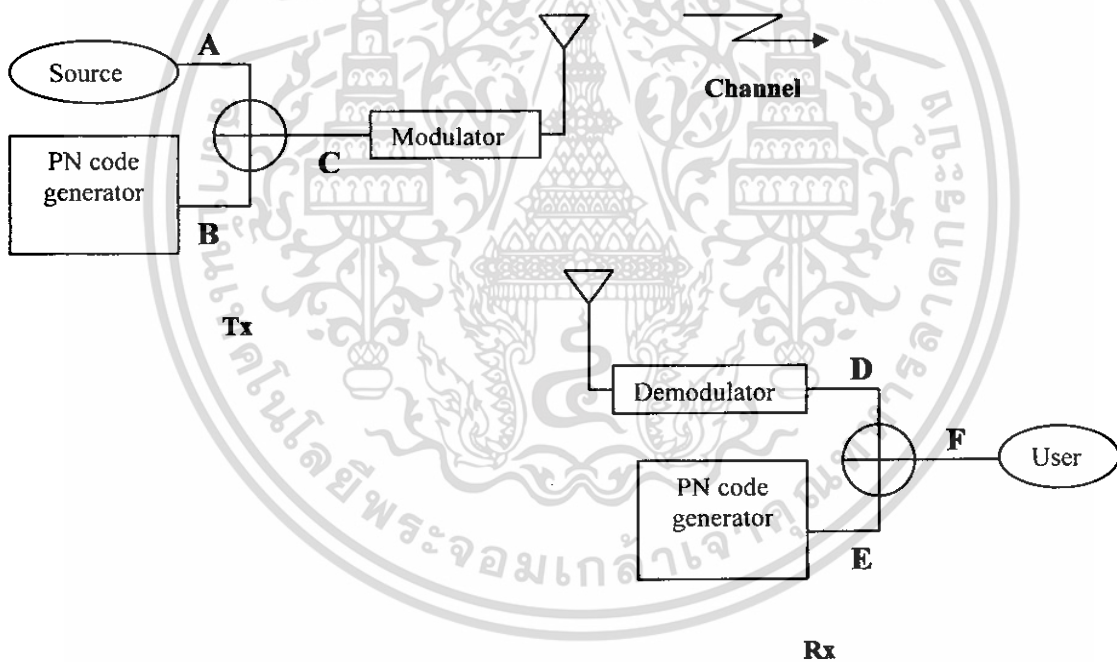


รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเข้ารหัสสัญญาณและการมอดูเลต

จากตัวอย่างรูปที่ 2.5 สมมติว่าใช้รหัส PN ความยาว 10 บิตคูณกับสัญญาณข้อมูลความยาว 1 บิตจะได้สัญญาณที่มีอัตราบิตสูงกว่าสัญญาณข้อมูลเดิม 10 เท่า แล้วจึงทำการการมอดูเลตสัญญาณให้อยู่ในรูปของความต่างคาบของคลื่นสัญญาณ ก่อนจะส่งสัญญาณออกไป

| | | |
|-----------------------------------|------------|------------|
| A - สัญญาณข้อมูล | 1 | 0 |
| B - รหัส PN | 1001011010 | 1001011010 |
| C - ลำดับข้อมูลที่ส่งออกไป | 1001011010 | 0110100101 |
| D - ลำดับข้อมูลที่ได้รับ | 1001011010 | 0110100101 |
| E - รหัส PN | 1001011010 | 1001011010 |
| F - สัญญาณที่จากการดีสเปรด | 1 | 0 |

กระบวนการรับส่งสัญญาณทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยสัญญาณข้อมูลของผู้ส่งจากจุด A จะทำการคูณกับสัญญาณรหัส PN จากจุด B จะได้เป็นสัญญาณสเปกตรัมแม่ ฒ จุด C ก่อนทำการมอดูเลตโดยเทคนิคความต่างของมุมเฟส (BPSK)



รูปที่ 2.6 กระบวนการรับส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้รับ

ข้อดีของระบบ DS-CDMA

- 1) การสร้างสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสทำได้ง่ายโดยกระบวนการคูณธรรมดา
- 2) ไม่จำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์ระหว่างผู้ใช้
- 3) มีความยืดหยุ่นในการให้บริการด้วยหลายอัตราความเร็ว
- 4) มีความสามารถในการรองรับผู้ใช้บริการจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของ DS-CDMA

- 1) ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ใกล้-ไกลของสัญญาณ (Near-Far Effect) เนื่องจากผู้ใช้แต่ละรายส่งสัญญาณโดยใช้ความกว้างแถบทั้งหมดที่มีอยู่ และกำลังงานที่ได้รับจากผู้ใช้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานจะมากกว่ากำลังงานของผู้ใช้ที่อยู่ไกล ทำให้เกิดการแทรกสอด และกลบกำลังสัญญาณของผู้ใช้ที่อยู่ไกล จึงต้องใช้กระบวนการควบคุมกำลัง (Power Control) เพื่อให้สถานีได้รับกำลังเฉลี่ยของผู้ใช้แต่ละรายเท่าๆกัน ซึ่งทำได้ยากในทางปฏิบัติ
- 2) การเริ่มต้นและรักษาการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณที่ได้รับกับสัญญาณที่สร้างขึ้นทางด้านรับทำได้ยาก กระบวนการซิงโครไนซ์จะต้องเกิดขึ้นในช่วงเวลาของชิป

2.3 รหัสแผ่ (Spreading Code)

รหัสแผ่หรือรหัสนั้นเป็นรหัสที่ใช้ในระบบ CDMA เพื่อคูณกับสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายเพื่อให้ผู้ใช้จำนวนมากสามารถเข้าถึงทรัพยากรช่องสัญญาณความถี่วิทยุอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และให้เกิดการแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ให้น้อยที่สุด นั่นหมายถึงรหัสแผ่ของผู้ใช้แต่ละรายจะต้องมีคุณสมบัติตั้งฉากกัน (Orthogonal) อย่างสมบูรณ์ หรือมีค่าสหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างรหัส (Cross correlation) เป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม รหัสที่มีคุณสมบัติดังกล่าวออกแบบได้ยาก อีกทั้งจำนวนชุดรหัสมีขนาดจำกัด จึงทำให้อาจตั้งฉากกันอย่างไม่สมบูรณ์ รหัสแผ่ที่ใช้ในระบบ DS-CDMA มีหลักๆอยู่สองประเภทหลักคือ

2.3.1 Orthogonal Code

เป็นรหัสที่ตั้งฉากกันอย่างสมบูรณ์ เมื่อไม่มีการเลื่อนของรหัสจะมีค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรหัสเป็นศูนย์ แต่เมื่อมีการเลื่อนรหัสสหสัมพันธ์ไขว้อาจมีค่ามากได้ในบางกรณี รหัสชนิดนี้มีคุณสมบัติทางอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ที่ไม่ดี ตัวอย่างรหัสชนิดนี้ได้แก่ Hadamard Walsh Code เป็นต้น

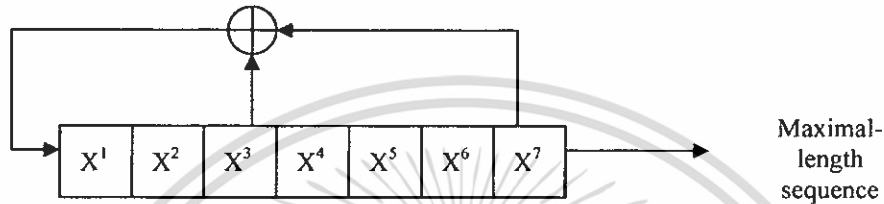
2.3.2 Pseudorandom Noise-Sequence (PN Sequence)

เป็นรหัสไบนารีที่มีค่าสหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างรหัสไม่เท่ากับศูนย์ แต่มีค่าต่ำมาก ทั้งในกรณีมีการเลื่อนรหัสและไม่มีการเลื่อนรหัส นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอัตสหสัมพันธ์ที่ดีด้วย ตัวอย่างของรหัสชนิดนี้เช่น Maximal Length Sequence (M-Sequence) Gold Code และ Kasami Sequence เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Maximal-Length Sequence (M-Length Code)

ตามทฤษฎีแล้ว รหัสลำดับตัวเลขความยาวสูงสุดถูกสร้างขึ้นแบบเรคคอม โดยมีคุณสมบัติสร้างลำดับตัวเลขที่มีคุณสมบัติตั้งฉากโดยอัตโนมัติ และเป็นพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างลำดับรหัส PN ที่ใช้งานในระบบ CDMA หลักการสร้างทำได้โดยการนำรีจิสเตอร์ (Register) หลายตัวมาต่อกัน และทำการซีฟท์รหัสไปนารีเข้าไปทีละตัว พร้อมกับมีวงจรป้อนกลับ แสดงดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ซีฟท์รีจิสเตอร์สร้างรหัสข้อมูล M-Length

จากรูปที่ 2.7 เราสามารถที่จะสร้างลำดับรหัสที่แตกต่างกันได้มากถึง $2^m - 1$ รูปแบบก่อนที่ลำดับจะซ้ำกันอีกรอบ บางครั้งจึงถูกเรียกว่ารหัสลำดับ m (m -sequence) โดยจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ 3 ข้อ

1) คุณสมบัติสมดุล (Balance Property) หมายถึง จำนวนรวมของบิต 1 ทั้งหมดในลำดับจะมากกว่าจำนวนรวมบิต 0 ทั้งหมดในลำดับอยู่หนึ่งตัว

2) คุณสมบัติรัน (Run Property) รัน หมายถึง ชุดของบิตซ้ำกันที่อยู่ติดกันของบิต 0 และบิต 1 โดยมีข้อกำหนดว่า

หนึ่งในสองของจำนวนรันทั้งหมดจะเป็นรันที่มีความยาว 1 บิต

หนึ่งในสี่ของจำนวนรันทั้งหมดจะเป็นรันที่มีความยาว 2 บิต

หนึ่งในแปดของจำนวนรันทั้งหมดเป็นรันที่มีความยาว 3 บิต

·
·
·

3) คุณสมบัติของสหสัมพันธ์ (Correlation Property) หมายถึง อัตราสหสัมพันธ์และสหสัมพันธ์ไขว้ของรหัสลำดับ m เป็นไปตามคุณสมบัติเช่นเดิม

ตัวอย่าง

พิจารณารหัสลำดับไบนารีความยาว 15 บิต

100110101111000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาคุณสมบัติสมมูล

จำนวนของบิต 0 ทั้งหมดเท่ากับ 7 บิต

จำนวนของบิต 1 ทั้งหมดเท่ากับ 8 บิต

เพราะฉะนั้นตรงตามคุณสมบัติสมมูล

พิจารณาคุณสมบัติรัน

จำนวนชุดบิต 0 มีทั้งสิ้น 4 ชุด

จำนวนชุดบิต 0 ที่อยู่ติดกัน 1 ตัว มี 2 ชุด (ต้องมี $1/2 * 4 = 2$ ชุด)

จำนวนชุดบิต 0 ที่อยู่ติดกัน 2 ตัว มี 1 ชุด (ต้องมี $1/4 * 4 = 1$ ชุด)

จำนวนชุดบิต 0 ที่อยู่ติดกัน 3 ตัว มี 1 ชุด (ต้องมี $1/8 * 4 = 0.5 \Rightarrow 1$ ชุด)

จำนวนชุดบิต 1 มีทั้งสิ้น 4 ชุด

จำนวนชุดบิต 1 ที่อยู่ติดกัน 1 ตัว มี 2 ชุด (ต้องมี $1/2 * 4 = 2$ ชุด)

จำนวนชุดบิต 1 ที่อยู่ติดกัน 2 ตัว มี 1 ชุด (ต้องมี $1/4 * 4 = 1$ ชุด)

จำนวนชุดบิต 1 ที่อยู่ติดกัน 3 ตัว มี 0 ชุด (ต้องมี $1/8 * 4 = 0.5 \Rightarrow 1$ ชุด)

จำนวนชุดบิต 1 ที่อยู่ติดกัน 4 ตัว มี 1 ชุด (ต้องมี $1/8 * 4 = 0.5 \Rightarrow 1$ ชุด)

เพราะฉะนั้นใกล้เคียงกับคุณสมบัติรันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

พิจารณาคุณสมบัติของสหสัมพันธ์

ให้ $[b]$ แทนรหัสลำดับไบนารีข้างต้น

$[b]^{(j)}$ แทนลำดับที่ถูกชิฟท์ (Shift) ไปทางขวา j บิต

$$\begin{aligned} \text{พิจารณา } [b] \oplus [b]^{(1)} &= [10011010111000] \oplus [010011010111100] \\ &= [110101111000100] \text{ รหัสที่ได้มีคุณสมบัติเหมือนเดิม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พิจารณา } [b] \oplus [b]^{(2)} &= [10011010111000] \oplus [001001101011110] \\ &= [101111000100110] \text{ รหัสที่ได้ยังคงมีคุณสมบัติเหมือนเดิม} \end{aligned}$$

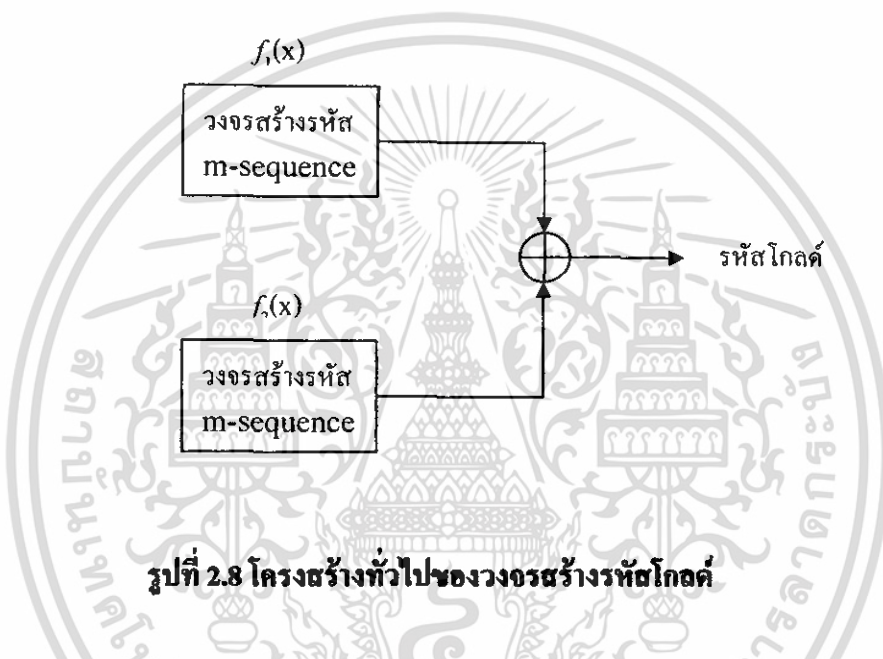
พิจารณา $[b] \oplus [b]^{(j)}$ เมื่อ $j = 3, 4 \dots 14$ เรายังคงได้ลำดับรหัสที่มีคุณสมบัติเหมือนเดิม

จึงกล่าวได้ว่าตรงกับคุณสมบัติสหสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 รหัสโกลด์ (Gold Code)

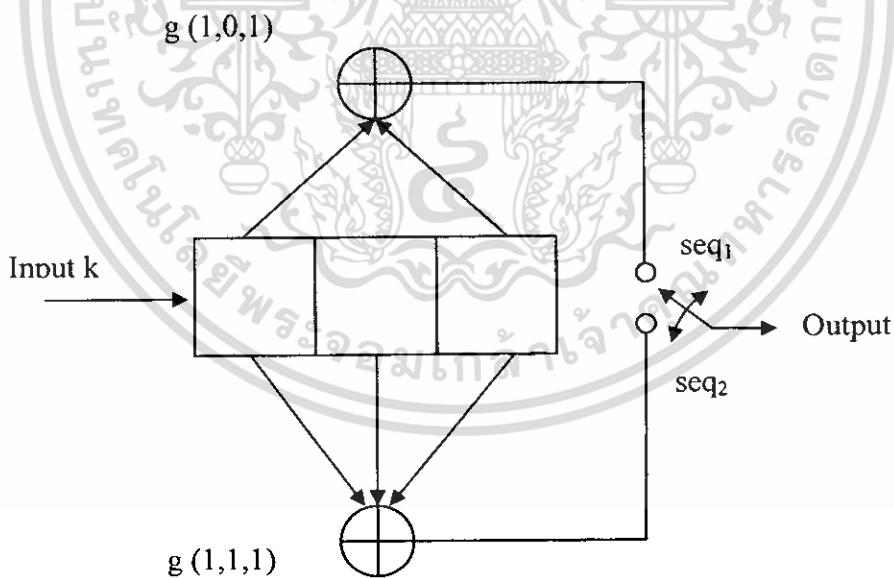
รหัสโกลด์เป็นรหัสที่พัฒนาขึ้นมาใหม่โดยสร้างจากวงจรรำก้านนิครหัส m -sequence 2 ชุดที่มีความยาวเท่ากันแต่สร้างขึ้นจากพหุนามตัวกำเนิดที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากรูปจะเห็นได้ว่า โครงสร้างรหัสโกลด์ประกอบขึ้นจากการนำลำดับชิปของรหัส m -sequence ที่กำเนิดจากพหุนาม $f_1(x)$ และ $f_2(x)$ มาบวกกันแบบมอดุโล 2 ทีละชิป และผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ ลำดับชิปของรหัสโกลด์ตามต้องการ



จุดน่าสนใจของรหัสโกลด์คือสามารถใช้กำเนิดลำดับชิปแบบต่างๆ ได้มากมาย หากเปรียบเทียบกับลำดับ m -sequence ที่ใช้ชิฟต์รีจิสเตอร์ (Shift Register) ทั้งหมด r ตัวเท่ากัน กรณีรหัส m -sequence จะให้ลำดับชิปที่มีคาบความยาวเท่ากับ $P = 2^r - 1$ และมีชุดรหัส m -sequence ที่แตกต่างกันได้ทั้งหมดเท่ากับจำนวนพหุนามพริมีทีฟ สำหรับ $r = 9$ จะมีรหัส m -sequence ได้เท่ากับ 48 ชุด ส่วนกรณีของรหัสโกลด์เมื่อใช้ชิฟต์รีจิสเตอร์ (Shift Register) ทั้งหมด r ตัวในแต่ละบล็อกจะสามารถให้ลำดับชิปที่มีคาบความยาวเท่ากับ $P = 2^r - 1$ เท่ากับกรณีของรหัส m -sequence แต่จะมีชุดรหัสโกลด์ที่แตกต่างกันได้มากถึง $2^r + 1$ ชุด เช่น สำหรับ $r = 9$ จะมีรหัสโกลด์อยู่จำนวน 513 ชุด ซึ่งมากกว่ากรณีของรหัส m -sequence มาก นอกจากนี้ถ้านำลำดับชิปที่ได้จากรหัสโกลด์คู่ใดคู่หนึ่งมาพิจารณาในเชิงสหสัมพันธ์ไขว้พบว่า เราสามารถทราบค่าขอบเขตสูงสุดได้

2.6 รหัสคอนโวลูชัน (Convolutional Code)

การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolutional Code) เป็นการเข้ารหัสโดยการนำข้อมูลในอดีตจำนวนหนึ่งที่ป้อนเข้ามาทำการประมวลผลร่วมกับข้อมูลที่ป้อนเข้ามา ณ เวลานั้นๆ เพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ใหม่ โดยวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ประกอบด้วยตัวหน่วงเวลา (Delay) หรือชิฟต์รีจิสเตอร์และตัวบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) หรือ Exclusive OR การทำงานของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน นั้น ข้อมูลอินพุต (k) จะถูกส่งเข้าอินพุตของวงจรเข้ารหัสแบบต่อเนื่อง โดยข้อมูลเอาต์พุตของการเข้ารหัส (n) เกิดจากการนำข้อมูลอินพุต (k) และข้อมูลในชิฟต์รีจิสเตอร์มาบวกแบบมอดูโล 2 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Constraint Length (K) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงจำนวนของข้อมูลอินพุต (k) และข้อมูลสูงสุดในชิฟต์รีจิสเตอร์ที่นำมาบวกแบบมอดูโล 2 ในการหาค่าเอาต์พุต และค่า Generator Polynomial (g) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงตำแหน่งข้อมูลอินพุตและข้อมูลในชิฟต์รีจิสเตอร์ที่นำมาบวกแบบมอดูโล 2 ส่วนค่าอัตราเข้ารหัส (R) เป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลอินพุต (k) ต่อจำนวนเอาต์พุต (n) หรือ k/n วงจรตัวอย่างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน (rate $1/2$ $K=3$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป แสดงให้เห็นว่าที่ค่า Constraint Length เท่ากับ 3 และ n เท่ากับ 2 ดังนั้น Code Rate เท่ากับ $1/2$ ซึ่งจำนวนบิตของข้อมูลข่าวสารจะวิ่งเข้าไปในชิฟต์รีจิสเตอร์จากซ้ายไปขวาแล้ว ตัว วงจรบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) จะเป็นตัวเข้ารหัสโดยสลับเอาที่พหุที่ออกมาได้เป็น สองทางจะเห็นว่าตัววงจรบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของ รหัสเนื่องจากถ้ามีการเปลี่ยนการเชื่อมต่อระหว่าง Adder กับชิฟต์รีจิสเตอร์จะทำให้เกิดรหัสที่ ต่างกัน

การทำงานของวงจรมัน ให้ค่าในชิฟต์รีจิสเตอร์มีค่าเป็นบิต “0” จากนั้นป้อนลำดับข้อมูล เข้าไปในชิฟต์รีจิสเตอร์ทีละบิต เมื่อข้อมูลทั้งหมดเข้าไปในชิฟต์รีจิสเตอร์จนหมดแล้ว ให้ป้อนบิต “0” แทนในลำดับถัดไป จนบิตสุดท้ายของลำดับข้อมูลออกจากชิฟต์รีจิสเตอร์ซึ่งการเขียนรูปแบบ ของภาคเข้ารหัสจะระบุเป็นเซตของ n Connection Vector และ n Modulo-2 Adder โดยเวกเตอร์มี มิติเท่ากับ K จากนั้นก็ให้ค่า บิต “1” แสดงตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างชิฟต์รีจิสเตอร์กับ วงจรบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) และ บิต “0” แสดงตำแหน่งที่ไม่ได้มีการเชื่อมต่อกัน ระหว่างชิฟต์รีจิสเตอร์กับวงจรบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) ดังนั้นจะได้ Connection Vector g_1 สำหรับการเชื่อมต่อด้านบน และ g_2 สำหรับการเชื่อมต่อด้านล่าง ดังนี้

$$g_1 = "101" \quad (2.2)$$

$$g_2 = "111" \quad (2.3)$$

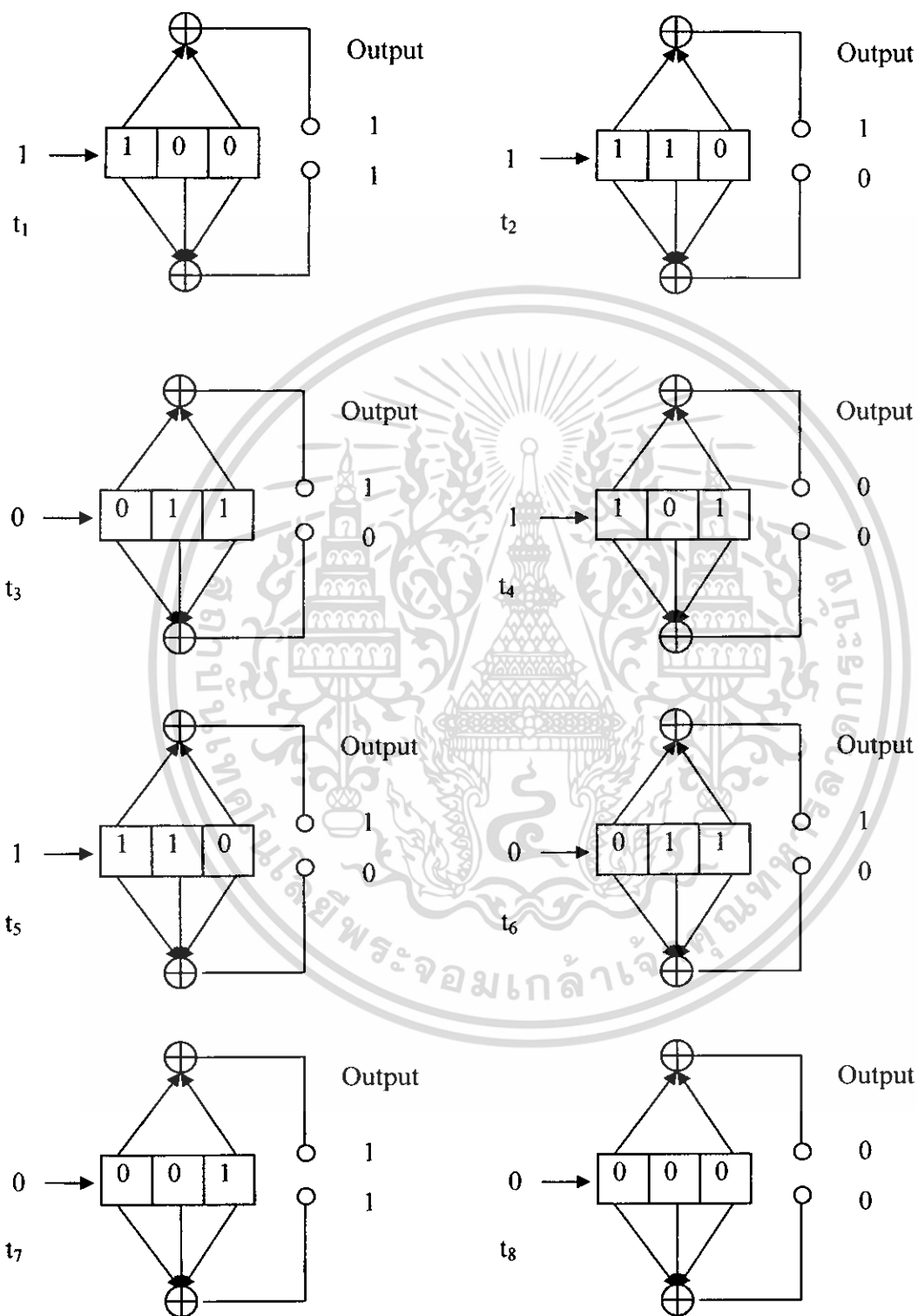
ซึ่งบางครั้งอาจใช้โพลีโนเมียล (Polynomial) ในการแสดงภาคเข้ารหัสโดยให้ดีกรีสูงสุด ของโพลีโนเมียลเท่ากับ $K-1$ และแทนสัมประสิทธิ์เป็น “1” เมื่อชิฟต์รีจิสเตอร์กับตัววงจรบวกแบบ มอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) ต่อเข้าด้วยกัน และ “0” เมื่อชิฟต์รีจิสเตอร์กับตัววงจรบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo-2 Adder) ไม่ได้ต่อกัน จากรูปที่ 2.9 เขียน $g_1(x)$ แทนการเชื่อมต่อด้านบนและ $g_2(x)$ แทน การเชื่อมต่อด้านล่างดังนี้

$$g_1(x) = 1 + x^2 \quad (2.4)$$

$$g_2(x) = 1 + x + x^2 \quad (2.5)$$

สมมติว่าทำการป้อนข้อมูลหกบิตแรกเข้าสู่วงจรมีค่าเป็น 11011 คำรหัสที่ได้จากวงจร เข้ารหัสจะมีค่าเท่ากับ 11 10 10 00 10 10 11 00 รายละเอียดของตัวอย่างการเข้ารหัสได้ แสดงขั้นตอนไว้ในรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

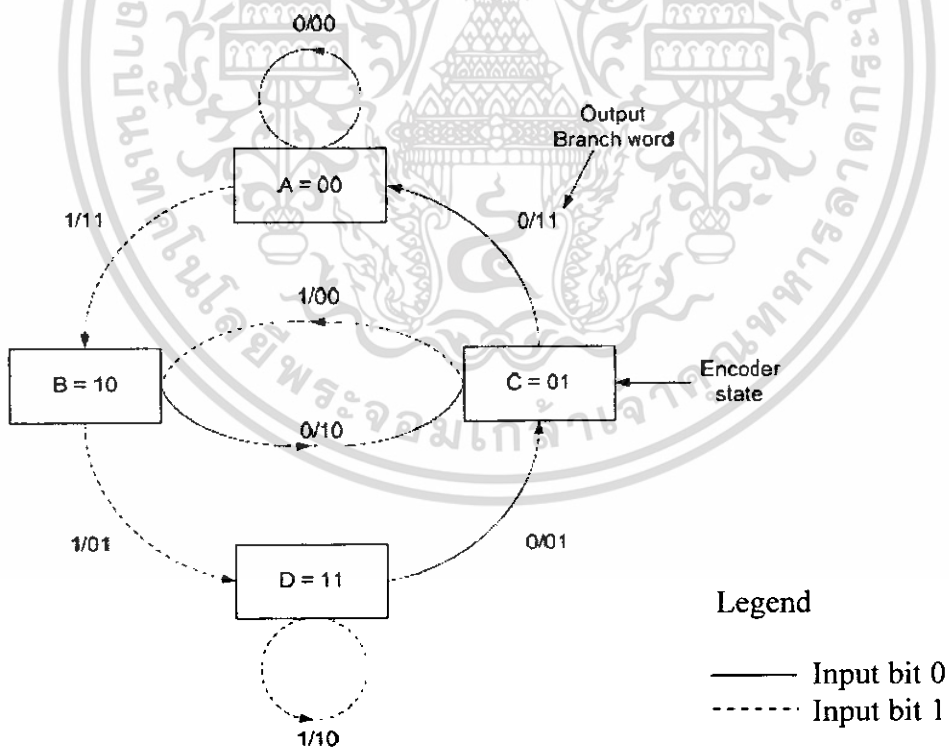


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสคอนโวลูชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 แผนภาพการเปลี่ยนสถานะ (State Diagram)

สำหรับการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูลแบบคอนโวลูชันโดยใช้แผนภาพสถานะนั้นจะเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกรับไว้ในวงจรเข้ารหัส ข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้นๆ และผลลัพธ์ที่ได้หลังจากมีการป้อนข้อมูลรูปแบบต่างๆกับวงจร ลักษณะของแผนภาพสถานะดังรูปที่ 2.11 เป็นแผนภาพสถานะของวงจรเข้ารหัสข้อมูลตัวอย่างของรูปที่ 2.9 มีการแสดงข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่ถูกรับไว้ในวงจรเข้ารหัสซึ่งเป็นตัวเลขที่อยู่ในสัญลักษณ์สี่เหลี่ยม โดยในกรณีของวงจรตัวอย่างนั้นมีข้อมูลเก็บไว้ในวงจรเท่ากับสองบิต ดังนั้นจำนวนของข้อมูลทั้งหมดที่เป็นไปได้จะมีค่าเท่ากับ 2^2 หรือ 4 สถานะและสำหรับลูกศรที่อยู่ในรูปนั้นจะแสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสถานะของข้อมูลในวงจรเข้ารหัสจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่งเมื่อมีข้อมูลป้อนเข้ามาในวงจร และเลข x/c ที่อยู่เหนือลูกศรนั้นจะแสดงถึงข้อมูลที่ถูกรับเข้ามา (x) โดยเส้นที่แทนข้อมูลที่ถูกรับเข้ามาเป็น "0" เส้นประแทนข้อมูลที่ถูกรับเข้ามาเป็น "1" และ คำรหัสที่ได้หลังจากการทำงาน (c)



รูปที่ 2.11 แผนภาพสถานะ (State Diagram) ของวงจรเข้ารหัสที่มี $rate=1/2$, $K=3$

2.7 อัลกอริทึมถอดรหัสแบบแมพ (MAP Decoding Algorithm)

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

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

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{P\{u_i = 1 | r\}}{P\{u_i = 0 | r\}} \quad (2.6)$$

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

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

APPs ตามสมการด้านบน สามารถนำมาคำนวณหาค่าได้จาก trellis diagram โดย

$$P\{u_i = 0 | r\} = \sum_{(m', m) \in B^0} P\{S_{t-1} = m', S_t = m | r\} \quad (2.7)$$

$$P\{u_i = 1 | r\} = \sum_{(m', m) \in B^1} P\{S_{t-1} = m', S_t = m | r\} \quad (2.8)$$

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

$$P\{u_t = 0 | r\} = \sum_{(m',m) \in B_t^0} \frac{P\{S_{t-1} = m', S_t = m, r\}}{P\{r\}} \quad (2.9)$$

$$P\{u_t = 1 | r\} = \sum_{(m',m) \in B_t^1} \frac{P\{S_{t-1} = m', S_t = m, r_t^N\}}{P\{r\}} \quad (2.10)$$

โดยที่ $P\{r\}$ เป็นค่าคงที่ เนื่องจากมันไม่มีผลกระทบต่อการทำให้มีค่ามากที่สุดและจะไม่นำไปพิจารณาในการคำนวณต่อไป

เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณหาค่าบิตข้อมูล APPs ฟังก์ชันความน่าจะเป็นต่อไปนี้ได้มีการอธิบายไว้

$$\alpha_t(m) = P\{S_t = m, r_t^i\} \quad (2.11)$$

$$\beta_t(m) = P\{r_{t+1}^N | S_t = m\} \quad (2.12)$$

$$\gamma_t^i(m', m) = P\{u_t = i, S_t = m, r_t, S_{t-1} = m'\} \quad (2.13)$$

โดยที่

$$r_t = (r_{t,0}, \dots, r_{t,1}, \dots, r_{t,n-1}) \quad (2.14)$$

$$r_t^k = (r_t, r_{t+1}, \dots, r_k) \quad (2.15)$$

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

$$P\{S_{t-1} = m', S_t = m, r\} = \alpha_{t-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \beta_t(m) \quad (2.16)$$

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

$$\alpha_t(m) = \sum_{m'} \alpha_{t-1}(m') \sum_{i \in 0,1} \gamma_t^i(m', m) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta_i(m) = \sum_{m'} \beta_{i+1}(m') \sum_{i \in \{0,1\}} \gamma_i'(m', m) \quad (2.18)$$

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

$$\gamma_i'(m', m) = p_i(u_i = i) \prod_{j=0}^{i-n-1} P\{r_{i,j} | x_{i,j}\} \quad (2.19)$$

$$P\{r_{i,j} | x_{i,j}\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(r_{i,j} - x_{i,j})^2}{2\sigma^2}} \quad (2.20)$$

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

ถ้าเราสมมติให้ตัวเข้ารหัส (Encoder) เริ่มต้นและจบลงที่สถานะศูนย์ ขอบเขตของเงื่อนไขจะเป็น

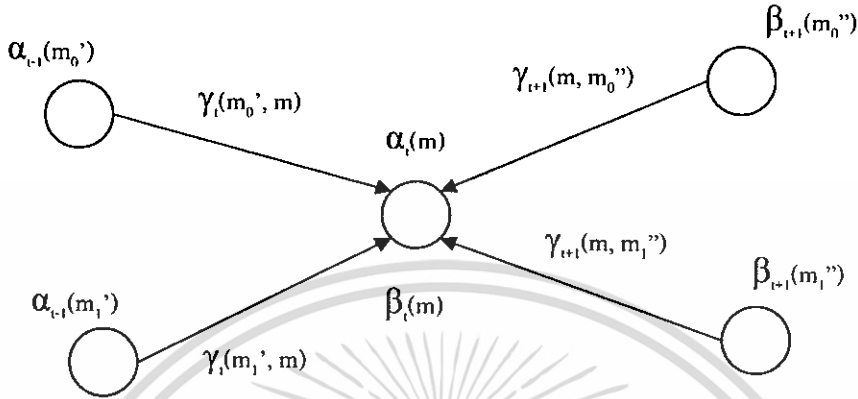
$$\begin{aligned} \alpha_0(0) &= 1, & \alpha_0(m) &= 0 & \text{for } m \neq 0, \\ \beta_N(0) &= 1, & \beta_N(m) &= 0 & \text{for } m \neq 0, \end{aligned}$$

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

$$\Lambda(u_i) = \log \frac{\sum_{(m',m) \in B^1} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i^1(m', m) \beta_i(m)}{\sum_{(m',m) \in B^0} \alpha_{i-1}(m') \gamma_i^0(m', m) \beta_i(m)} \quad (2.21)$$

อัลกอริทึมข้างต้นนี้ โดยปกติแล้วจะอยู่ในกลุ่มอัลกอริทึมไปข้างหน้าและไปข้างหลัง (forward/backward algorithm) เนื่องจากสัมประสิทธิ์ $\alpha_i(m)$ สามารถวนลูบกำนวนหาได้ตั้งแต่

ตอนเริ่มต้น trellis (forward recursion) และตัวสัมพันธ์ $\beta_i(m)$ ก็สามารถวนลูบคำนวณได้ ตอนท้ายของ trellis (backward recursion)



รูปที่ 2.12 แผนภาพการวนลูบไปข้างหน้าและไปข้างหลัง

รูปที่ 2.12 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 $S_{t-1} = m_i \rightarrow S_t = m$ ที่มีสาเหตุจากบิตข้อมูล $u_i = i, i = 0, 1$ ในทำนองเดียวกัน $\beta_{t+1}(m_i)$ แสดงถึงสัมประสิทธิ์ β ที่แสดงถึงสถานะ m_i ในสถานะ $(t+1)$ th trellis ที่ซึ่งเชื่อมต่อกับสถานะ m ในสถานะ t th trellis และที่การเปลี่ยนแปลงสถานะ $S_t = m \rightarrow S_{t+1} = m_i$ ที่เกิดจากบิตข้อมูล $u_i = i, i = 0, 1$ ค่า APP ของบิตข้อมูลสามารถคำนวณได้จาก

$$P\{u_i = 1 | r\} = \frac{e^{\Lambda(u_i)}}{1 + e^{\Lambda(u_i)}} \quad (2.22)$$

$$P\{u_i = 0 | r\} = \frac{1}{1 + e^{\Lambda(u_i)}} \quad (2.23)$$

ค่า APP ของบิตข้อมูลที่ถูกส่งออกไปสามารถคำนวณได้โดยบวกค่าความน่าจะเป็นของค่ารหัสที่ประกอบด้วยบิตที่ถูกส่งโดยเฉพาะ นั่นก็คือ

$$P\{x_{t,j} = 1 | r\} = \sum_{u_i = i, x_{t,j} = 1} P\{u_i = i | r\} \quad (2.24)$$

$$P\{x_{t,j} = -1 | r\} = \sum_{u_i = i, x_{t,j} = -1} P\{u_i = i | r\} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การวางสลับ (Interleaving)

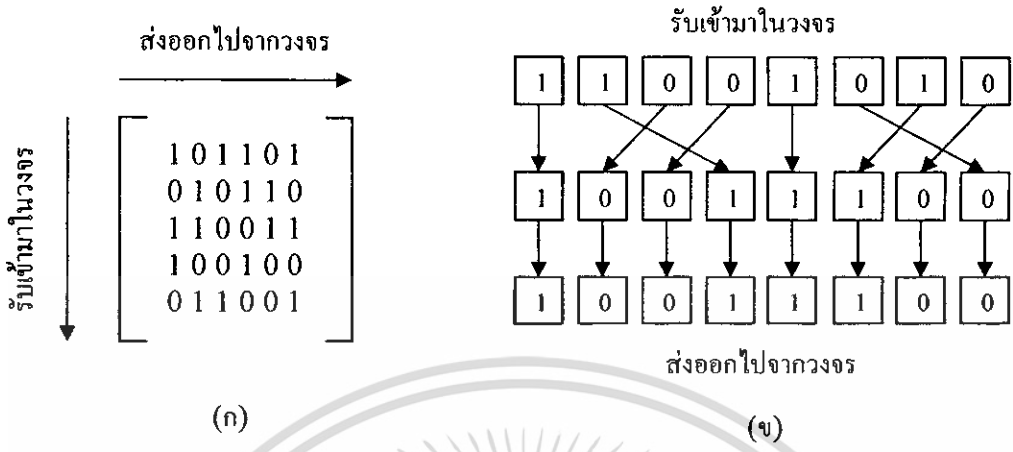
การวางสลับ (Interleaving) ข้อมูลนั้นเป็นวิธีการในการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงข้อมูลดิจิทัลให้มีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากเดิม ซึ่งถูกนำมาใช้ในระบบสื่อสารเพื่อป้องกันการผิดพลาดของข้อมูลในรูปแบบของบิตผิดพลาดที่ต่อเนื่องกันหลายบิต (Burst Error) สำหรับวิธีการที่ใช้ในการวางสลับข้อมูลนั้น จะมีรูปแบบในการทำงานอยู่หลายวิธีการด้วยกัน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

2.8.1 การวางสลับข้อมูลแบบบล็อก (Block Interleaving)

สำหรับการวางสลับข้อมูลแบบบล็อกนั้นจะเป็นวิธีการที่มีการนิยมใช้งานสำหรับระบบสื่อสาร เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบของลำดับข้อมูล มีลักษณะการทำงานที่สามารถแสดงโดยใช้เมตริกดังรูปที่ 2.13 (ก) การทำงานนั้นจะเริ่มจากการดึงข้อมูลที่จะทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเข้ามาเก็บไว้ในเมมโมรีซึ่งจะมีการเก็บข้อมูลเรียงจากบนลงล่าง และย้ายไปขวา โดยจะมีการเก็บข้อมูลในลักษณะนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมมโมรีในวงจรมีการเก็บข้อมูลไว้ทุกตำแหน่งแล้ว จากนั้นจึงส่งข้อมูลออกจากวงจร โดยการเรียงลำดับการส่งจากซ้ายไปขวา และบนลงล่าง และจะมีการส่งข้อมูลในลักษณะนี้เรื่อยๆ จนกระทั่งข้อมูลทุกตำแหน่งในเมมโมรีถูกส่งออกจากวงจรแล้ว จากนั้นจึงมีการรับข้อมูลชุดต่อไปเข้ามาในวงจรเพื่อทำงานในครั้งต่อไป โดยจะมีการทำงานในลักษณะนี้จนกระทั่งข้อมูลทั้งหมดได้ผ่านกระบวนการวางสลับแล้ว จึงสิ้นสุดการทำงาน

2.8.2 การวางสลับข้อมูลแบบสุ่ม (Random Interleaving)

ในการวางสลับข้อมูลด้วยวิธีการแบบสุ่ม (Random Interleaving) นั้น จะใช้วิธีการสุ่มตัวเลขขึ้นมาเพื่อกำหนดรูปแบบในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล โดยในการนำงานนั้น จะมีการนำข้อมูลมาครั้งละ 1 ชุด เพื่อทำการสลับตำแหน่งของข้อมูลให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆตามรูปแบบของค่าที่ได้จากการสุ่ม โดยจะมีลักษณะในการทำงานดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13 (ข) เป็นตัวอย่างของการวางสลับข้อมูลแบบสุ่มที่มีการดึงข้อมูลเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 8 บิตเพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของข้อมูล



รูปที่ 2.13 การวางระดับข้อมูล (ก) Block Interleaving, (ข) Random Interleaving

2.9 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ DS-SS-CDMA

แม้ว่าการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่จะช่วยลดผลจากสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดต่างๆ ได้ อย่างไรก็ตามถ้าหากผลของสัญญาณรบกวนมีค่ามาก ข่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการส่งข้อมูล ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ในที่นี้เราจะทำการวัดประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณจากผลรบกวนของสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) และสัญญาณแทรกสอดในระบบ CDMA

2.9.1 สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN)

สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) นั้นเกิดขึ้นในชั้นมอดูเลตรหัสแผ่กับคลื่นพาห้ เป็นสัญญาณรบกวนแบนด์กว้างที่มีการกระจายตัวแบบขาว การตีสเปกตรัมด้วยรหัส PN ไม่มีผลต่อความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม และฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนเป็นเหตุให้อัตราความผิดพลาดบิต (BER) ของสัญญาณรบกวน AWGN ในระบบการแผ่สเปกตรัมมีค่าเท่ากับอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ของสัญญาณรบกวนที่ถูกมอดูเลตและดีมอดูเลตด้วยคลื่นพาห้ที่ปราศจากการแผ่สเปกตรัม คือ BER เป็นฟังก์ชันของ E_b/N_0 เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพของสัญญาณ BPSK แบบร่วมนัยในระบบการแผ่สเปกตรัม แสดงได้เป็นได้ดังนี้

$$BER = P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{E_b / N_0} \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ $E_b = CT_b$ = ค่ากำลังเฉลี่ยบิตของสัญญาณที่ได้รับ
 C = กำลังเฉลี่ยของคลื่นพาห้ที่ได้รับ
 N_o = ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน
 T_b = คาบเวลาต่อ 1 บิต

2.9.2 สัญญาณรบกวนแถบแคบ

โดยปกติจะกำหนดให้กำลังของสัญญาณรบกวน AWGN มีค่าต่ำกว่ากำลังของสัญญาณแทรกสอด สัญญาณแทรกสอดแถบแคบแสดงการพิสูจน์โดยสัญญาณความถี่เดียวหรือสัญญาณคลื่นพาห้ ในกรณีสัญญาณแทรกสอดแถบแคบมีผลกระทบมากๆ และสามารถแทนโดยสมการ

$$v_r(t) = \sqrt{2P_s} d(t)g(t) \cos \omega_0 t + \sqrt{2P_j} (\cos \omega_0 t + \theta) \quad (2.27)$$

- เมื่อ $d(t)$ คือสัญญาณเบสแบนด์ที่ภาคส่ง หรือสัญญาณเอาต์พุตที่เครื่องรับ
 $g(t)$ คือสัญญาณแม่ PN
 ω_0 คือความเร็วเชิงมุม
 P_j คือกำลังของสัญญาณแทรกสอด
 P_s คือกำลังของสัญญาณข้อมูลที่ภาครับ
 θ คือค่าแรนดอมที่มีมุมตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา

สัญญาณแทรกสอดแถบแคบสามารถกำจัดได้โดย Narrowband Demodulator filter

2.9.3 สัญญาณรบกวนแถบกว้าง

สัญญาณแทรกสอดแถบกว้างเกิดจากสัญญาณในระบบ DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum) ที่มีอัตราชีพ f_c เดียวกัน แต่มีรหัส PN ต่างกัน และมีผลต่อการตีสเปกตรัมสัญญาณที่ต้องการ ค่า BER ของสัญญาณแทรกสอดชนิดนี้มีค่าเท่ากับ BER ของสัญญาณแทรกสอดแถบแคบ สัญญาณแทรกสอดแถบกว้างนั้นสามารถขจัดได้โดยเลือกค่าสัญญาณรหัส PN ที่มีค่าสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่กำหนดได้ยาก จึงได้มีการใช้เทคนิคของคิเทกเตอร์เพื่อประมาณค่าสัญญาณที่รับได้ให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.10 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องรับในระบบ DS-CDMA

2.10.1 สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานอื่นในระบบเดียวกัน (MAI)

เนื่องด้วยผู้ใช้ทุกรายในระบบใช้ช่องสัญญาณความถี่เดียวกันและในเวลาเดียวกัน เพียงแต่ใช้รหัสที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายอาจเกิดการแทรกสอดได้ เนื่องจากการตั้งฉากไม่สมบูรณ์ของรหัสแผ่ของผู้ใช้งานแต่ละราย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จึงต้องพัฒนาเทคนิคที่เครื่องรับสัญญาณเพื่อให้สามารถแยกสัญญาณที่ต้องการออกมา โดยเกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด

2.10.2 ปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-Far Effect)

เป็นสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากกรณีของผู้ใช้งานในระบบอยู่ห่างจากสถานีฐาน เป็นระยะทางที่แตกต่างกัน ทำให้สัญญาณจากผู้ที่อยู่ใกล้สถานีถูกแทรกสอดโดยสัญญาณจากผู้ที่อยู่ใกล้สถานีมากกว่า เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้สถานีมากกว่ามีกำลังสัญญาณที่แรงกว่า เป็นเหตุให้เครื่องรับสัญญาณตรวจวัดสัญญาณผิดพลาด วิธีการแก้คือพยายามควบคุมให้กำลังงานจากผู้ใช้แต่ละรายมาถึงสถานีฐานด้วยกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน

2.10.3 เฟดดิ้ง (Fading)

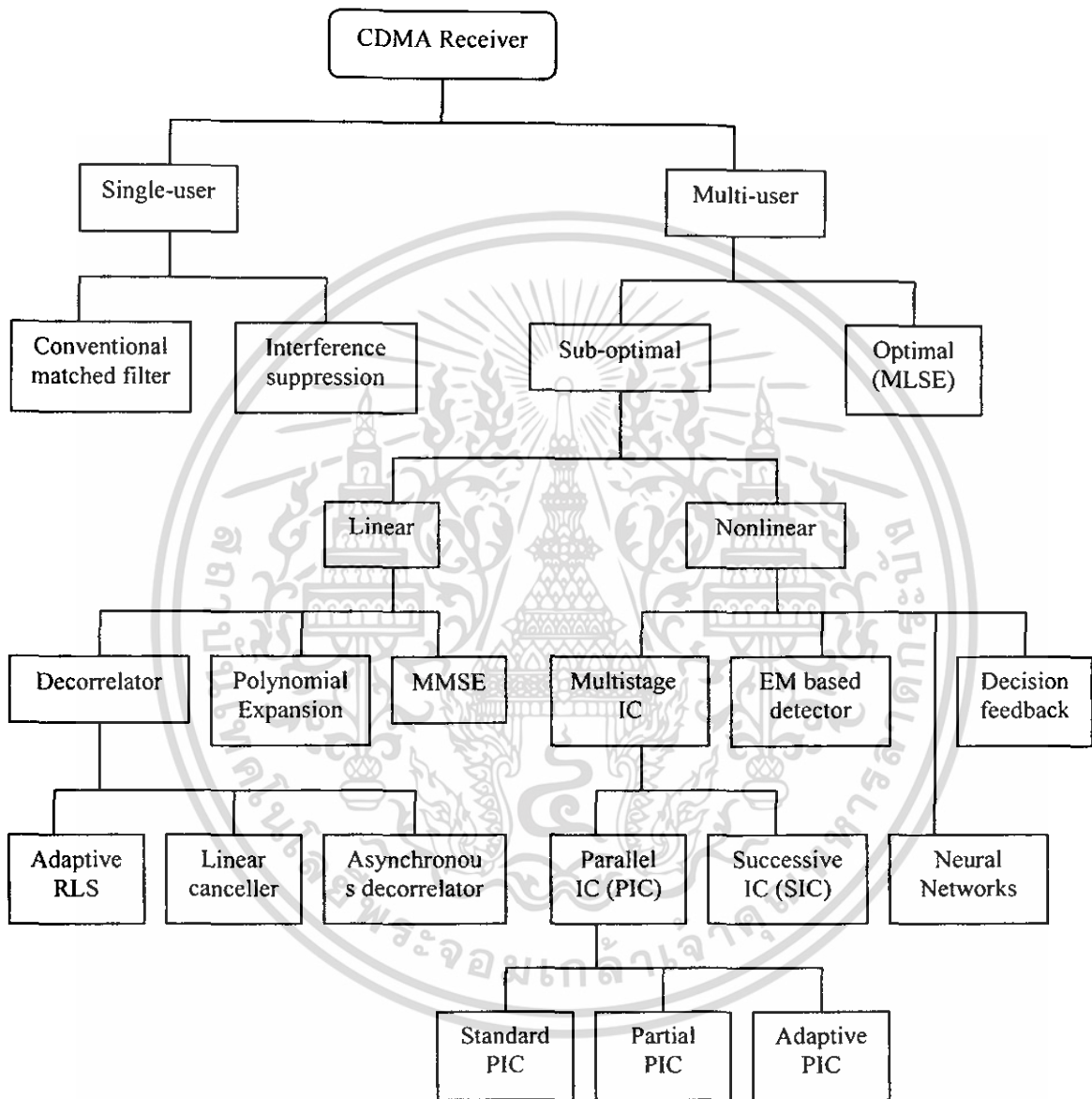
จากการรับส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์เคลื่อนที่กับสถานีฐานนั้น ไม่ได้เดินทางเป็นเส้นตรงทีเดียว หากแต่มีการสะท้อน การหักเห เป็นเหตุให้สัญญาณไปถึงฝั่งรับในหลายเส้นทาง (Multipath) ทำให้สัญญาณที่ได้รับมีมูฟเฟสที่ผิดไปจากสัญญาณจริง จึงเกิดการลดทอนของสัญญาณขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเฟดดิ้ง นอกจากนี้การที่อุปกรณ์เคลื่อนที่เข้าใกล้หรือออกห่างสถานีฐานด้วยความเร็วสูง ยังก่อให้เกิดปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler) ด้วย ทำให้ผู้ใช้ได้รับสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าหรือต่ำกว่าปกติ

2.11 เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายคน (Multiuser Detection)

ปัญหาสำคัญในระบบ CDMA แบบธรรมดา (Conventional CDMA) ซึ่งใช้เครื่องรับสัญญาณแบบแมตช์ (Match Filter) ก็คือเรื่องของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้งานอื่นๆ (MAI) เนื่องจากการใช้ช่องสัญญาณขนาดใหญ่ร่วมกัน ฉะนั้นปริมาณของสัญญาณแทรกสอดจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสสปรดิ่งจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น เครื่องรับแบบดั้งเดิมจะได้รับผลตอบแทนเป็นรหัสแผ่ของตนเอง แต่ไม่สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดจากผู้อื่นออกไป และคิดเป็นสัญญาณรบกวน ดังนั้นหากระบบมี MAI มากๆ ข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องรับก็จะมีผลกระทบที่ผิดพลาดจนคุณภาพของการให้บริการลดลง ด้วยความต้องการที่จะเพิ่มความจุของระบบให้สูงขึ้น จึงได้มีการคิดค้นเทคนิคที่จะเพิ่มคุณภาพการให้บริการด้วยแนวคิดที่นำความรู้เกี่ยวกับผู้ใช้งานรายอื่นๆ ในระบบมาจัด MAI สำหรับผู้ใช้งานแต่ละคน ซึ่งเครื่องรับแบบมัลติยูเซอร์นั้นนอกจากสามารถจัด MAI แล้วยังสามารถทนทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกลดีขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาสถานีฐานซึ่งทำการรับส่งสัญญาณกับผู้ใช้งานทุกรายในเซลล์ เมื่อใช้เครื่องรับชนิดที่ถอดรหัสสัญญาณโดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับสปรดิ่งโค้ดและสัญญาณของผู้ใช้งานอื่นๆ ในเซลล์ มาทำการลด MAI ก่อนจะทำการตัดสินใจของสัญญาณข้อมูลที่ถูกลดรหัสออกมา ทำให้สัญญาณมีคุณภาพที่สูงขึ้น และเป็นการเพิ่มความจุให้กับระบบโดยรวมด้วย Verdu ได้เสนอเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Receiver) โดยแสดงให้เห็นว่าระบบ CDMA ไม่ได้ถูกจำกัดด้วยปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้หรือปรากฏการณ์ใกล้-ไกล อย่างไรก็ตามเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดของ Verdu ซับซ้อนเกินกว่านำมาใช้งานจริง จึงได้มีการนำเสนอโมดัลติยูเซอร์ดิเทกชันที่มีสมรรถนะต่ำลงมาแต่มีความซับซ้อนน้อยกว่า หรือเครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไป (Suboptimal Receiver) รูปที่ 2.14 แสดงลำดับชั้นของเทคนิคเครื่องรับสัญญาณ CDMA ต่างๆ



รูปที่ 2.14 ลำดับชั้นของเทคนิคเครื่องรับสัญญาณ CDMA

2.11.1 เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Receiver)

มัลติยูเซอร์คิเทกชันที่เสนอโดย Verdu ใช้หลักการของ Maximum Sequence Estimation (MLSE) ในการจัดลำดับสัญญาณที่ส่งมา โดยพิจารณาชุดข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด แม้วิธีนี้จะให้ประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมแต่ก็มีความซับซ้อนมาก การวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งไปที่เครื่องรับที่มีประสิทธิภาพรองลงมาแต่ให้สมรรถนะที่เหมาะสม

2.11.2 เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงมา (Sub-optimal Receiver)

เครื่องรับที่มีประสิทธิภาพรองลงไปเป็นเครื่องรับที่มีสมรรถนะด้อยกว่าเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดแต่ก็ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเครื่องรับแบบแมตซ์รวมทั้งความซับซ้อนไม่ได้เพิ่มตามจำนวนผู้ใช้แบบเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลักคือแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น

2.11.2.1 เครื่องรับแบบเชิงเส้น

เครื่องรับประเภทนี้จะวางในตำแหน่งหลังเครื่องรับแบบแมตซ์ สัญญาณที่ออกจากเครื่องรับแบบแมตซ์จะถูกส่งเข้าเครื่องรับแบบเชิงเส้น ก่อนเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่คือ

- 1) ดีคอรีเลเตอร์ (Decorrelator) เป็นเครื่องรับที่มีผลตอบเป็นอินเวอร์สของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ (Correlation Matrix) ของรหัสแผ่ของผู้ใช้ทุกรายในระบบ
- 2) การขยายค่าพหุนาม (Polynomial Expansion) เป็นเครื่องรับแบบที่ออกแบบมาเพื่อกำจัดความซับซ้อนในการคำนวณค่าอินเวอร์สเมตริกซ์ที่ใช้ในดีคอรีเลเตอร์และ MMSE โดยใช้วิธีคำนวณสัมประสิทธิ์พหุนาม
- 3) เครื่องรับแบบลดค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาด (MMSE) เป็นเครื่องรับที่ใช้กระบวนการที่ให้ผลตอบสนองเป็นเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของรหัสแผ่ของผู้ใช้ร่วมกับเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวน เครื่องรับชนิดนี้จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าดีคอรีเลเตอร์ในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีมาก

2.11.2.2 เครื่องรับแบบไม่เชิงเส้น

เครื่องรับประเภทนี้ทำงานโดยการประมาณสัญญาณของผู้ใช้รายอื่นๆในระบบ แล้วนำไปหักล้างออกจากสัญญาณที่ได้รับ จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้จากการหักล้างแล้วไปทำกระบวนการตัดสินใจต่อไป แบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

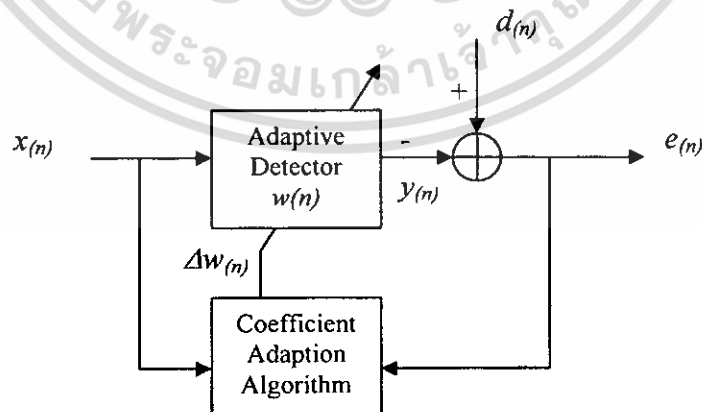
1) เครื่องรับแบบหักล้างการแทรกสอดหลายชั้น (Multistage IC) มีหลักคือทำการประมาณบิตของผู้ใช้ทุกคนชั้นแรกโดยเครื่องรับแมตซ์ จากนั้นจึงนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการหักล้างสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รายอื่นออกจากสัญญาณที่รับได้ หรืออาจเพิ่มความถูกต้องโดยการเปลี่ยนเครื่องรับแบบแมตซ์เป็นคิอริเลเตอร์ หรือวิธีอื่นๆ

2) เครื่องรับแบบเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดของค่าทำนาย (EM based detector) เครื่องรับประเภทนี้ใช้หลักของอัลกอริทึม EM (Expectation Maximization) ในการทำนาย

3) เครื่องรับแบบนำข้อมูลที่ตัดสินใจแล้วมาป้อนกลับ (Decision Feedback) เป็นเครื่องรับที่ประกอบด้วยวงจรกรอง 2 วงจร คือ วงจรกรองไปข้างหน้าและวงจรกรองป้อนกลับ โดยวงจรกรองไปข้างหน้ามีหน้าที่กำจัดผลของผู้ใช้ที่มีกำลังต่ำกว่าออกจากผู้ใช้ที่มีกำลังสูงกว่า ส่วนวงจรกรองป้อนกลับมีหน้าที่ป้อนผลการตัดสินใจบิตของผู้ใช้ที่มีกำลังสูงกว่าเพื่อไปช่วยในการตัดสินใจบิตของผู้ใช้ที่มีกำลังต่ำกว่า

2.12 วงจรกรองแบบปรับค่าได้ (Adaptive detector)

เครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ใช้หลักการของการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของระบบให้สอดคล้องกับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงเชิงเวลา (Time-varying) ที่ได้รับเข้ามา หลักการทำงานนั้นจะมีตัวแปรสัมประสิทธิ์ที่คูณกับสัญญาณขาเข้าเพื่อให้ได้สัญญาณขาออก จากนั้น สัญญาณขาออกที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) เพื่อหาค่าผิดพลาด และนำค่าผิดพลาดที่ได้ไปปรับค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีขึ้น จำนวนรอบของการวนปรับค่ายังสูง สัญญาณที่ดีก็จะยิ่งดี แนวคิดแบบปรับค่าได้แสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างการทำงานของเครื่องรับสัญญาณแบบปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริทึมแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันก็คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least-Mean-Square: LMS) จากรูปที่ 2.15 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็น

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} w_k(n)x(n-k) = W^T(n)X(n) \quad (2.28)$$

$$W(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \dots \ w_{N-1}(n)]^T \quad (2.29)$$

$$X(n) = [x(n) \ x(n-1) \dots \ x(n-N+1)]^T \quad (2.30)$$

| | | |
|-------|--------|-------------------------------------|
| เมื่อ | $x(n)$ | คือ สัญญาณขาเข้าที่ได้รับ |
| | $y(n)$ | คือ สัญญาณที่ออกจากวงจรปรับค่า |
| | $d(n)$ | คือ สัญญาณที่ต้องการ |
| | $w(n)$ | คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับค่า |
| | $W(n)$ | คือ เวกเตอร์เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ |
| | $X(n)$ | คือ เวกเตอร์เมทริกซ์ของสัญญาณขาเข้า |

สัญญาณผิดพลาด $e(n)$ ที่เกิดขึ้นหาได้จากค่าต่างระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่ได้รับ

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.31)$$

หลังจากนั้น เราจะนำค่าผิดพลาดที่ได้มาปรับปรุงค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์เดิมเพื่อให้ประสิทธิภาพดีขึ้นดังสมการ

$$w_k(n+1) = w_k(n) + e(n)x(n-k) \quad (2.32)$$

อย่างไรก็ตามวงจรปรับค่าแบบ LMS นี้ประกอบด้วยกระบวนการป้อนสัญญาณกลับ ซึ่งจะต้องรอให้การทำงานรอบก่อนหน้าลุล่วง จึงจะเริ่มการวนรอบใหม่ ซึ่งทำให้ไม่สามารถทำการประมวลผลแบบสายท่อ (Pipeline) สำหรับแอปพลิเคชันเรียลไทม์ (Real time Application) ความเร็วสูงที่ต้องการประมวลผลทันทีและต่อเนื่อง ทำให้เกิดปัญหาที่เรียกว่าลาเทนซี (Latency Problem) จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มีการปรับปรุงอัลกอริทึมเพื่อรองรับการประมวลผลแบบสายท่อ และเรียกอัลกอริทึมนี้ว่า ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่น้อยที่สุดแบบหน่วงเวลาหรือ DLMS (Delayed LMS) ดังสมการ

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \mu e(n-M)x(n-k-M) \quad (2.33)$$

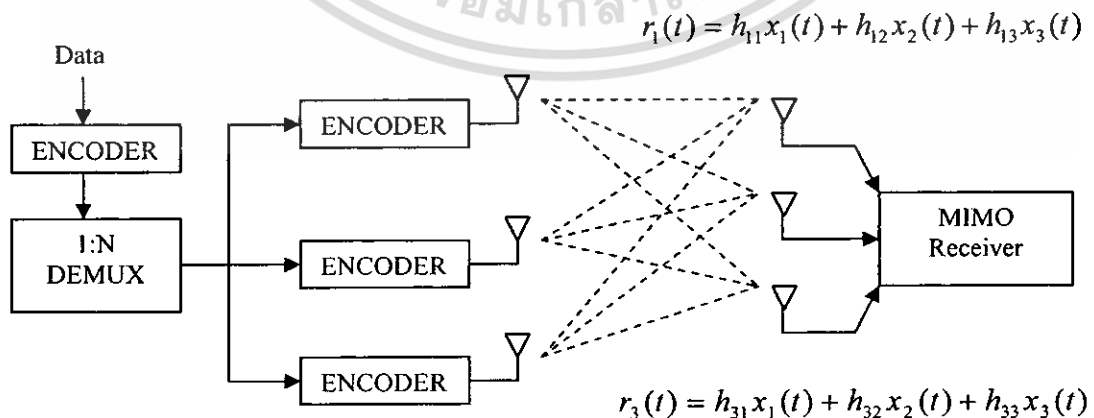
เมื่อ μ คือ ค่าช่วงก้าวสำหรับการประมาณ (step size)
 M คือ หน่วยหน่วงเวลา (delay-units)

2.13 ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)

ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก หรือ (Multi-Input Multi-Output, MIMO) เป็นการส่งข้อมูลโดยใช้หลายเสาอากาศในการส่งสัญญาณและหลายเสาอากาศในการรับสัญญาณ วิธีนี้เพิ่มปริมาณของ Throughput ในระบบโดยใช้แบนด์วิธ (Bandwidth) และกำลังในการส่งเท่าเดิม จึงทำให้วิธีนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบได้

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

ในระบบ MIMO นั้น ผู้ส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกัน (เช่น x_1, x_2, \dots, x_n) ผ่านเสาอากาศแต่ละตัวอย่างต่อเนื่องบนช่วงคลื่นความถี่เดียวกัน และผู้รับเสาอากาศแต่ละตัวก็จะได้รับสัญญาณจากทุกเสาอากาศของผู้ส่ง ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การรับส่งสัญญาณแบบ MIMO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณย่อยที่แต่ละเสาอากาศได้รับสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ดังแสดงไว้ด้านล่าง จะเห็นว่าเสาอากาศแต่ละตัวจะได้รับสัญญาณรวมกันของ $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ โดยพื้นฐานแล้วการรวมกันของสัญญาณนี้จะถูกมองว่าเป็นการแทรกสอด ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณ แต่เนื่องจากปฏิบัติกับช่องสัญญาณในรูปเมตริกซ์ จึงสามารถแปลงสัญญาณอิสระ x_i กลับคืนได้ โดยทำการประมาณสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณย่อย h_{ij} ซึ่งรวมกันเป็นเมตริกซ์ช่องสัญญาณ H จากนั้นนำค่า H^{-1} ไปคูณกับเวกเตอร์ r ที่เสาอากาศแต่ละตัวได้รับ ก็จะได้ค่าของ x_i

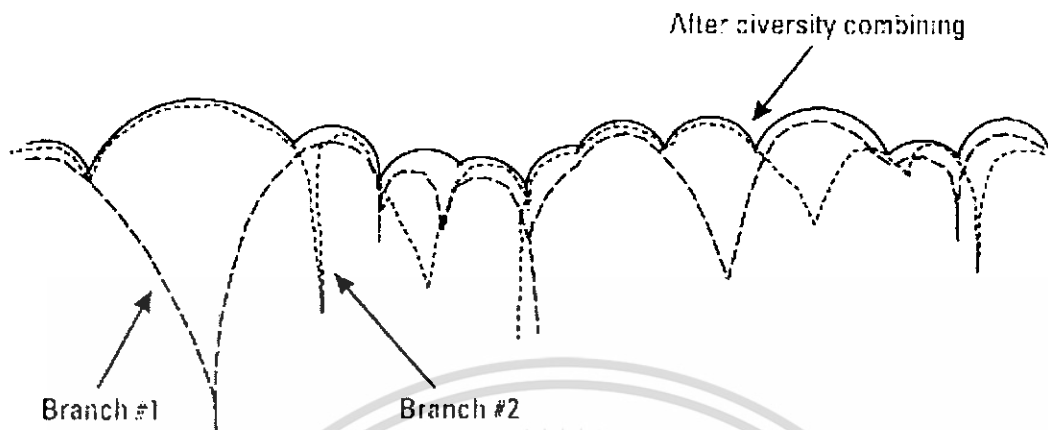
$$\begin{bmatrix} h_{11}x_1 & h_{12}x_2 & \dots & h_{1N}x_N \\ h_{21}x_1 & h_{22}x_2 & \dots & h_{2N}x_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{31}x_1 & h_{32}x_2 & \dots & h_{3N}x_N \end{bmatrix}$$

2.14 เทคนิคการทำไคเวอร์ซิตี (Diversity Techniques)

ในการสื่อสารโทรศัพท์ไร้สายวิธีการทำไคเวอร์ซิตี (Diversity Techniques) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการลดทอนของสัญญาณจากหลายทิศทาง (Multipath Fading) และเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบการสื่อสาร โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มกำลังในการส่งหรือเสียความจุช่องสัญญาณ (Bandwidth)

หลักการของวิธีการทำไคเวอร์ซิตี (Diversity Techniques) คือ ถ้าได้รับสัญญาณสุ่มอิสระมากกว่า 1 สัญญาณ ถึงแม้สัญญาณนั้นจะถูกลดทอนแต่การลดทอนของสัญญาณสุ่มอิสระแต่ละสัญญาณจะไม่มีความสัมพันธ์กันเลย ดังที่แสดงในรูปที่ 2.17 ยกตัวอย่างเช่น การที่สัญญาณสุ่มบางอันอาจถูกทอนหลายๆครั้ง ในขณะที่สัญญาณอื่นอาจจะไม่มีการลดทอนเกิดขึ้นเลยก็ได้ นั่นหมายความว่า ความน่าจะเป็นที่สัญญาณสุ่มทั้งหมดจะอยู่ต่ำกว่าระดับที่กำหนด จะมีค่าน้อยกว่าความน่าจะเป็นของสัญญาณสุ่มเพียงสัญญาณเดียวจะต่ำกว่าระดับที่กำหนด ดังนั้นภาครับจะได้รับสัญญาณที่เหมือนกันจากภาคส่งมากกว่า 1 เส้นทาง จึงสรุปได้ว่าวิธีการทำไคเวอร์ซิตี (Diversity) สามารถลดปัญหาการลดทอนที่รุนแรงมากๆของสัญญาณได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 สัญญาณที่ได้จากการทำไคเวอร์ซิตี และการรวมสัญญาณที่มาจากแต่ละเส้นทาง

ในระบบการสื่อสารไร้สายส่วนใหญ่ จะใช้วิธีการทำไคเวอร์ซิตี เพื่อให้ได้คุณภาพของสัญญาณขาออกตามที่ต้องการ เทคนิคการทำไคเวอร์ซิตีถูกแบ่งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ๆคือ การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity), การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) และการทำสเปซไคเวอร์ซิตี (Space Diversity)

2.14.1 การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity)

การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา ทำโดยการส่งสัญญาณที่เหมือนกัน ในแต่ละช่องเวลา (Time Slot) ซึ่งทำให้เกิดการลดทอนที่ต่างกันที่เครื่องรับ โดยช่องเวลา (Time Slot) ที่ใช้ในการแบ่งใน 1 คาบสัญญาณต้องมากกว่าช่องว่างที่ป้องกันการซ้อนทับของช่องเวลา (Coherence time of Ch) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเกิดการลดทอน (Fading Rate) ตามสมการ $1/f_d = c/vfc$

นอกจากนั้นในการทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity) ในการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ มีการใช้รหัสควบคุมข้อผิดพลาด(Error control coding) ร่วมกับวิธีการอินเตอร์ลีฟ (Interleave) ซึ่งจะทำให้เกิดการส่งข้อมูลในรูปแบบที่มีการสลับกันของช่องเวลาในแต่ละคาบการส่ง ทำให้สามารถลดอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ลงได้ เนื่องจากการแก้ไขสัญญาณที่มีความผิดพลาดติดกันเพียงไม่กี่บิตจะทำได้ง่ายกว่าการแก้ไขสัญญาณที่มีความผิดพลาดติดกันหลายบิต แต่การเกิดความผิดพลาดส่วนมากจะเป็นความผิดพลาดที่มีความผิดพลาดติดกันหลายบิต ดังนั้นเมื่อทำการอินเตอร์ลีฟจะเป็นการสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลที่ใช้ส่ง และเมื่อมีความผิดพลาดติดกันหลายบิตเกิดขึ้น หลังจากทำการถอดรหัสอินเตอร์ลีฟ (DeInterleave) แล้ว ความผิดพลาดที่ติดกันหลายบิตจะกลายเป็นความผิดพลาดติดกันเพียงไม่กี่บิตแต่หลายตำแหน่งแทน

การทำวิธีนี้จะได้ผลดีกับการลดทอนแบบฉับพลัน (Fast Fading) ซึ่งมีช่องว่างที่ป้องกันการซ้อนทับของช่องเวลา (Coherence Time of Channel) ขนาดเล็ก สำหรับการลดทอนแบบช้า (Slow Fading) การทำอินเตอร์ลีฟ (Interleave) จะทำให้เกิดการหน่วงเวลา (Delay) ซึ่งการใช้งานบางอย่างไม่สมควรที่จะเกิดการหน่วงเวลา ข้อเสียของการทำการทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงเวลา (Time Diversity) คือมีการซ้ำซ้อนของช่องเวลา (Time slot) ในสัญญาณ แต่ข้อมูลที่ได้รับ (Through put) เท่าเดิม จึงทำให้เสียประสิทธิภาพของการใช้ความจุช่องสัญญาณ (Bandwidth)

2.14.2 การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity)

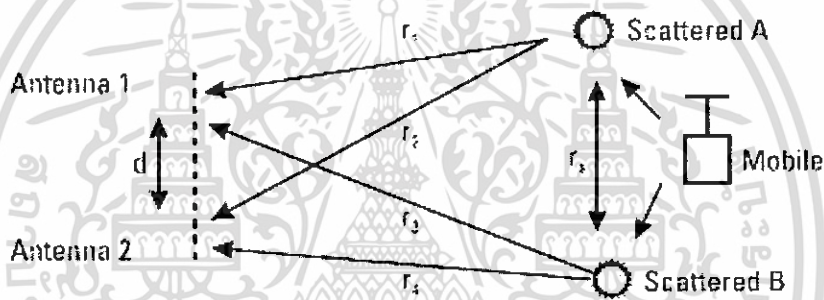
การทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) ใช้หลักการส่งข้อมูลที่เหมือนกันไปในหลายช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละช่วงความถี่ที่ถูกแบ่งจะต้องไม่เกี่ยวข้องกับช่วงความถี่อื่น ดังนั้นเพื่อให้แต่ละช่วงความถี่ไม่มีความสัมพันธ์กัน จะต้องมียช่องว่างของแต่ละช่วงความถี่ที่มีค่ามากกว่าช่องว่างที่เว้นไว้เพื่อป้องกันการซ้อนทับของช่วงความถี่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

ในการสื่อสารของโทรศัพท์มือถือ มีการทำสเปกตรัมกระจาย (Spread Spectrum) เพื่อขยายสัญญาณที่จะส่งทำให้กับภาครับสัญญาณเพื่อลดความผิดพลาดและการเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานในระบบ เช่น Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) และ การเข้ารหัสแบบหลายสัญญาณพาหะ (Multicarrier Modulation) วิธีสเปกตรัมกระจาย (Spread Spectrum) ถูกใช้เมื่อช่องว่างที่เว้นไว้เพื่อป้องกันการซ้อนทับของช่วงความถี่ (Coherence Bandwidth of Channel) นั้นมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม เมื่อช่องว่างที่เว้นไว้เพื่อป้องกันการซ้อนทับของช่วงความถี่ มีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณที่ขยายออก (Spreading Bandwidth) จะทำให้เกิดการขยายของการหน่วงเวลาด้วย ในกรณีนี้การทำสเปกตรัมกระจาย จะไม่มีประโยชน์สำหรับการทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) เลย

ข้อเสียของการทำไคเวอร์ซิตีตามช่วงความถี่ (Frequency Diversity) คือทำให้เสียความจุช่องสัญญาณเนื่องจากมีความซ้ำซ้อนของช่วงความถี่ที่เพิ่มขึ้น

2.14.3 การทำสเปซไคเวอร์ซิตี (Space Diversity)

การทำสเปซไคเวอร์ซิตีหรือเรียกว่าวิธีการทำไคเวอร์ซิตีตามเสาอากาศ (Antenna Diversity) ก็ได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการสื่อสารไร้สาย หลักการทำงานคือ ใช้หลายเสาอากาศร่วมกันในการส่งหรือการรับสัญญาณ ซึ่งแต่ละเสาอากาศจะวางห่างกันเป็นระยะที่เหมาะสม เพราะระยะห่างมีความสัมพันธ์กับเฟส (Phase) เพื่อที่จะได้รับสัญญาณที่ไม่มีความสัมพันธ์กันทางเฟส (Phase) เลย จากนั้นทำการส่งสัญญาณที่มีข้อมูลเหมือนกันไปในทุกๆเสาอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งแตกต่างกับการทำไคเวอร์ซิตีตามเวลาและการทำไคเวอร์ซิตีตามความถี่ คือ การทำสเปซไคเวอร์ซิตีไม่ทำให้เกิดการสูญเสียความจุช่องสัญญาณ



รูปที่ 2.18 การวางเสาอากาศในการส่งสัญญาณ 2 เสาให้มีความห่างเป็นระยะ d

แต่การทำสเปซไคเวอร์ซิตียังไม่มีการใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เนื่องจากมีต้นทุนที่สูงและพื้นที่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่มีจำกัดจึงไม่สามารถวางให้เสาอากาศห่างกันได้ตามที่กำหนด ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะสมกับการสื่อสารในอนาคตที่ต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง

2.15 การรวมไคเวอร์ซิตี (Diversity Combining)

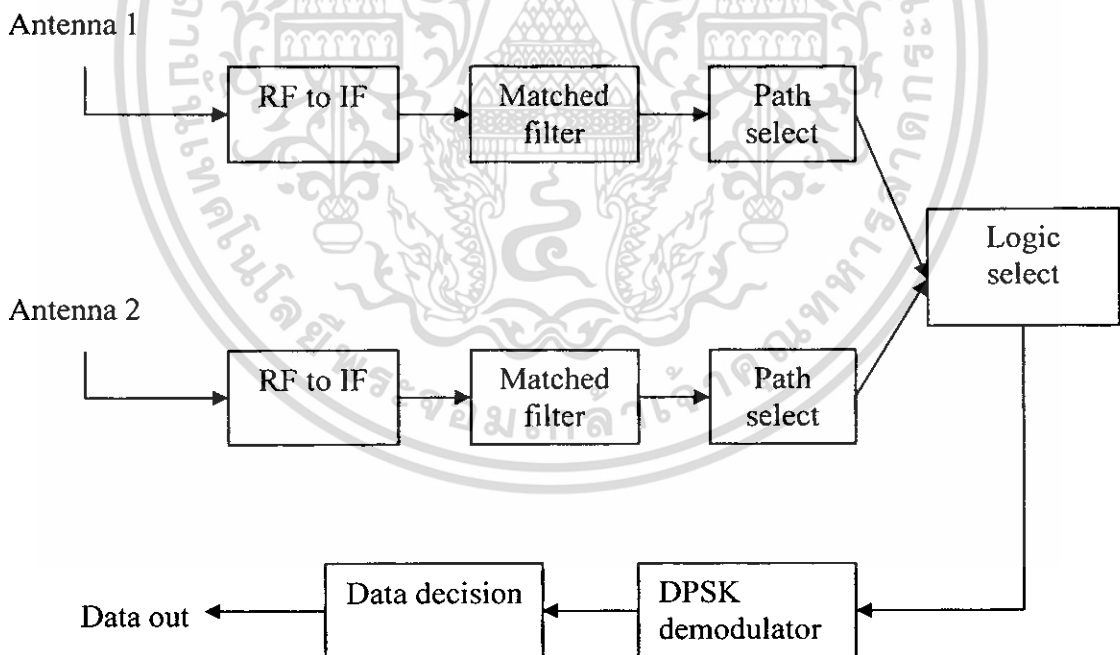
หัวข้อที่แล้วได้พูดถึงวิธีการทำไคเวอร์ซิตี (Diversity) ซึ่งมีการแบ่งประเภทตามประเภทที่แต่ละเส้นทางถูกสร้างขึ้น แต่ถ้าเกิดการลดทอนของสัญญาณเกิดขึ้นในทุกๆเส้นทางพร้อมๆกัน สัญญาณที่เราได้ก็จะไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นโดยทั่วไปประสิทธิภาพของการสื่อสารที่มีการทำไคเวอร์ซิตี จะขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณในทุกๆเส้นทางว่าได้รับการรวม (Combining) อย่างไรที่ภาครับ เพื่อเพิ่มค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.15.1 ซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง (Selective Combining)

ซีเล็กทีฟคอมไบนิ่งเป็นวิธีการรวมสัญญาณโดยอาศัยหลักการง่ายๆ คือภาครับพิจารณาเลือกรับเส้นทางที่มีค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) มากที่สุด โดยจะทำการตรวจสอบค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนตลอดเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 2.19 ดังนั้นสัญญาณที่ภาครับจึงเป็นสัญญาณที่ดีที่สุดเสมอ ในทางปฏิบัติ เราจะใช้สัญญาณที่มีผลรวมกำลังของสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวน (S+N) ที่มีค่ามากสุดในการเลือกสัญญาณ เนื่องจากการวัดค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) นั้นทำได้ยาก



รูปที่ 2.19 โครงสร้างการทำงานของซีเล็กทีฟคอมไบนิ่ง (Selective Combining)

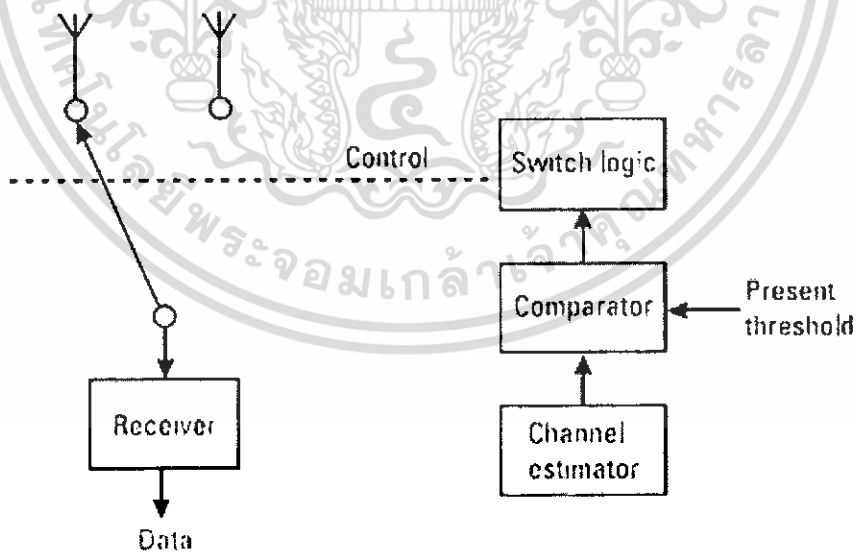
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2 สวิตช์คอมไบนิ่ง (Switched Combining)

สวิตช์คอมไบนิ่งมีหลักการทำงานคือ ภาครับพิจารณาข้อมูลจากทุกๆ ใดเวอร์ซิตีที่ส่งมาแล้วจะเลือกสัญญาณมาอันใดอันหนึ่งที่มีค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ดีกว่าระดับที่กำหนดไว้ ภาครับจะใช้สัญญาณที่เลือกมานั้นจนกระทั่ง ค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นภาครับจะตรวจสอบสัญญาณจากทุกเส้นทางอีกครั้ง เพื่อเลือกสัญญาณอื่นที่มีค่าอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าที่กำหนดไว้แทน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.20 วิธีนี้จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อว่าสแกนนิ่งคอมไบนิ่ง (Scanning combining)

เมื่อเปรียบเทียบวิธีนี้กับวิธีเลือกทีฟคอมไบนิ่งแล้ว สวิตช์คอมไบนิ่งมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า เนื่องจากสัญญาณที่เลือกมาใช้งาน ไม่ใช่สัญญาณที่ดีที่สุดเสมอ อย่างไรก็ตามวิธีนี้นำไปใช้ได้ง่ายกว่าวิธีเลือกทีฟคอมไบนิ่ง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบทุกๆ เส้นทางอยู่ตลอดเวลา

ทั้งวิธีเลือกทีฟคอมไบนิ่งหรือวิธีสวิตช์คอมไบนิ่งนั้น มีข้อเสียคือ สัญญาณที่เลือกมาใช้งานจะได้สัญญาณเพียงสัญญาณเดียวที่ได้จากการทำใดเวอร์ซิตีเท่านั้น ไม่มีการนำสัญญาณอื่นที่ไม่ได้รับการเลือกมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณเลย



รูปที่ 2.20 โครงสร้างการทำงานของสวิตช์คอมไบนิ่ง (Switched Combining)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

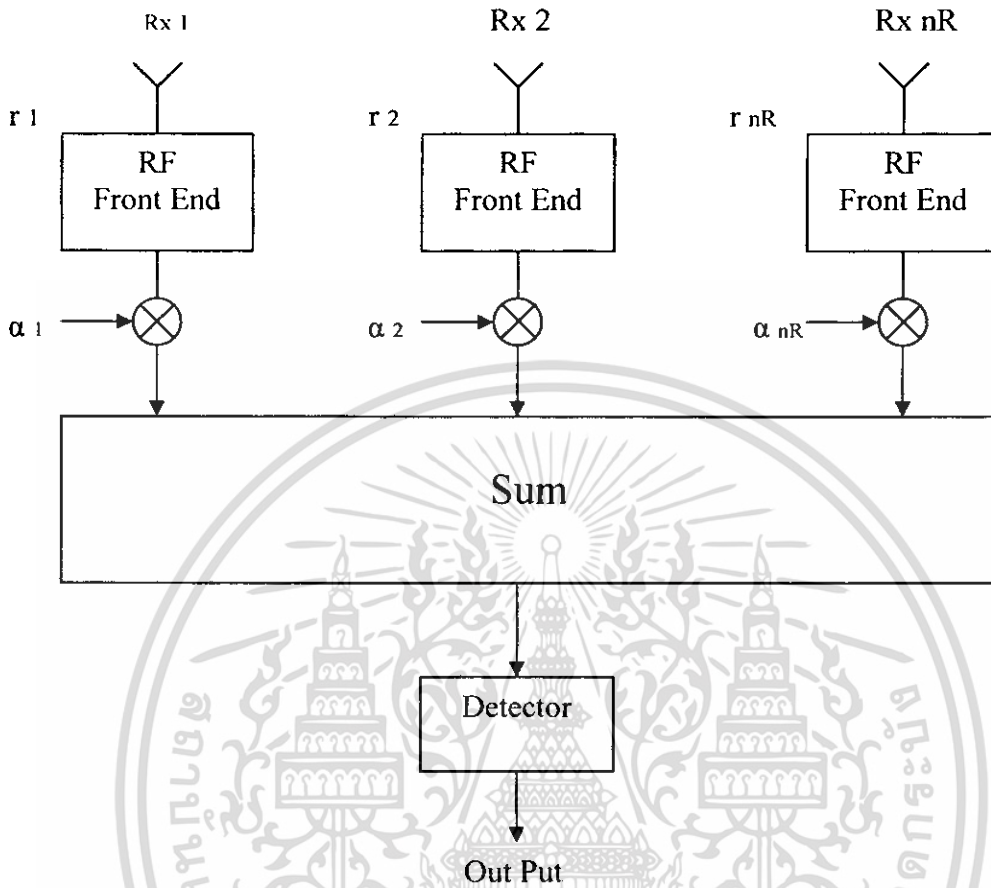
2.15.3 อีควอล์เกนคอมไบน์ (Equal-Gain Combining, EGC)

อีควอล์เกนคอมไบน์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพรองจากวิธีการรวมแบบเชิงเส้น ซึ่งวิธีนี้ไม่ได้ใช้การประมาณค่าของการลดทอนของแต่ละเส้นทาง แต่จะใช้การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ที่ภาครับแทน

หลักการการทำงานของอีควอล์เกนคอมไบน์คือ ภาครับทำการรับสัญญาณจากทุกเส้นทาง และรวมสัญญาณที่มีเฟสตรงกันเข้าด้วยกัน โดยมีค่าน้ำหนักที่เท่ากัน เพื่อให้สัญญาณมีกำลังมากขึ้น ในทางทฤษฎีประสิทธิภาพของการทำอีควอล์เกนคอมไบน์จะต่ำกว่าวิธีแมกซ์ิมัมเรโซคอมไบน์ แต่วิธีนี้มีความซับซ้อนของการทำงานน้อยกว่ามากจึงเป็นที่แพร่หลายในการใช้งาน

2.15.4 แมกซ์ิมัมเรโซคอมไบน์ (Maximal ratio combining, MRC)

แมกซ์ิมัมเรโซคอมไบน์ใช้หลักการว่า สัญญาณแต่ละเส้นทางที่รับมามีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ที่มีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง ภาครับทำการรวมทุกๆสัญญาณจากทุกๆเส้นทางเข้าด้วยกัน โดยมีการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุดออกมา ดังที่แสดงในรูปที่ 2.21 โดยเราสามารถคำนวณหาค่าน้ำหนัก (Weight) ได้จากผลของการทำดีมอดูเลชัน (Demodulation) โดยมีวิธีการทำคือ ให้ภาครับส่ง ส่งข้อมูล M ชุด ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้คือ ผลรวมของค่าน้ำหนักการดีมอดูเลชัน (Demodulation) ทั้ง M ชุด ค่าน้ำหนักมีค่าเท่ากับค่าจำนวนเชิงซ้อนของแชนแนลเกน (Channel Gain) และต้องทำการคูณสัญญาณคือเพื่อชดเชยเฟสที่เลื่อนไป (Phase-Shift) ในช่องสัญญาณ สุดท้ายจะได้ค่าน้ำหนักของสัญญาณมีสัดส่วนกับสัญญาณที่แรง ดังนั้นสัญญาณที่แรงจะมีค่าน้ำหนักที่มากกว่าสัญญาณที่อ่อนกว่า ซึ่งจะได้กลุ่มของคลื่นสัญญาณพาหะที่มีข้อมูลชุดเดียวกัน



รูปที่ 2.21 โครงสร้างการทำงานของแมกซ์ิมัรโคมบไนง (Maximal ratio combining, MCR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน

โครงงานนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบวงจรรับสัญญาณที่สามารถทำการปรับค่าสัญญาณแบบวนกลับโดยสามารถรองรับเสาอากาศในการรับส่งสัญญาณเป็นจำนวน $M \times N$ ตัว ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ที่จะมึบทบาทสำคัญต่อการใช้งานในอนาคต ตัววงจรที่ออกแบบนี้สามารถทำการจำลองสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ กำหนดจำนวนผู้ใช้งานในระบบ และยังสามารถกำหนดจำนวนรอบของการป้อนกลับเพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสัญญาณทั้งจากการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) และจากเครื่องรับสัญญาณวนแบบซ้ำปรับค่า

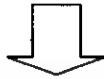
เมื่อทำการออกแบบ โครงสร้างของตัวรับสัญญาณได้แล้ว จึงทำการทดสอบการทำงานของตัวรับสัญญาณที่ออกแบบโดยเริ่มต้นจากการศึกษาเครื่องรับสัญญาณขาลง (Downlink) โดยกำหนดผู้ใช้งานในระบบ 2 รายและเริ่มจากสัญญาณเข้าและสัญญาณออกทางเดียว (SISO) คือมีเสาอากาศในการรับและส่งฝั่งละ 1 ตัว เพื่อทดสอบอัตราการผิดพลาดที่เกิดขึ้น จากนั้นเพิ่มความซับซ้อนโดยทำการเพิ่มจำนวนเสาอากาศทั้งในฝั่งรับและฝั่งส่ง หลังจากทำการทดลองศึกษาเครื่องรับสัญญาณขาลง (Downlink) แล้วจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของเครื่องรับสัญญาณขาขึ้น (Uplink)

อย่างไรก็ตาม การทำงานของตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามที่ออกแบบ ได้ใช้ข้อมูลที่มีการป้อนย้อนกลับ (Feedback) จากผู้ใช้งานอื่นและเสาอากาศอื่นมาปรับตัวกรองสัญญาณ เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้งานอื่นและเสาอากาศอื่นออกจากระบบ การป้อนย้อนกลับ (Feedback) นั้นยังมีการทำหลายรอบก็จะลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการป้อนย้อนกลับหลายรอบเท่าไรก็จะยิ่งเพิ่มภาระให้กับระบบมากยิ่งขึ้นแต่ทำให้ผลดีขึ้นในอัตราที่ลดลง จึงต้องกำหนดจำนวนรอบการป้อนกลับให้มีความเหมาะสม

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจำลองการทำงานโดยมีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ให้มีจำนวนรอบต่างกัน เพื่อให้สามารถประเมินค่าสัญญาณรบกวนที่สามารถลดลงไปได้ เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

ผู้จัดทำโครงงานจึงได้สรุปขั้นตอนการทำงานของโครงงานนี้ในรูปแบบของแผนภาพ ตามรูปที่ 3.1 เพื่อให้เข้าใจกับระบบขั้นตอนการทำงานง่ายยิ่งขึ้น

ศึกษาและออกแบบตัวรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative Detector) ที่ใช้เสาอากาศจำนวน $M \times N$ ตัวในการรับส่งข้อมูล เพื่อนำไปใช้กับการสื่อสารแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกหลายทาง (MIMO)



การทดลองที่ 1 ใช้โปรแกรม แมทแลบ (MATLAB) จำลองการรับส่งสัญญาณของผู้ใช้งานจำนวน k ราย โดยทำการปรับจำนวนเสาอากาศที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณทั้งขาลง (Downlink) และขาขึ้น (Uplink) โดยไม่มีการป้อนสัญญาณกลับ



การทดลองที่ 2 ใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) จำลองการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งาน k ราย โดยทำการปรับจำนวนเสาอากาศที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แต่กำหนดให้วงจรทำการปรับค่าโดยวนรอบป้อนสัญญาณย้อนกลับ (Feedback) จำนวนรอบแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดที่ลดลงจากจำนวนรอบการป้อนกลับที่เพิ่มขึ้น



นำผลการทดลองทั้งสองตอนมาทำการวิเคราะห์และสรุปผลว่าการรับส่งข้อมูลแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกหลายทาง (MIMO) ผสมกับเครื่องรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative Detector) ช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมดีขึ้นเพียงใดโดยพิจารณาจากอัตราผิดพลาดบิต (BER) ที่ลดลง

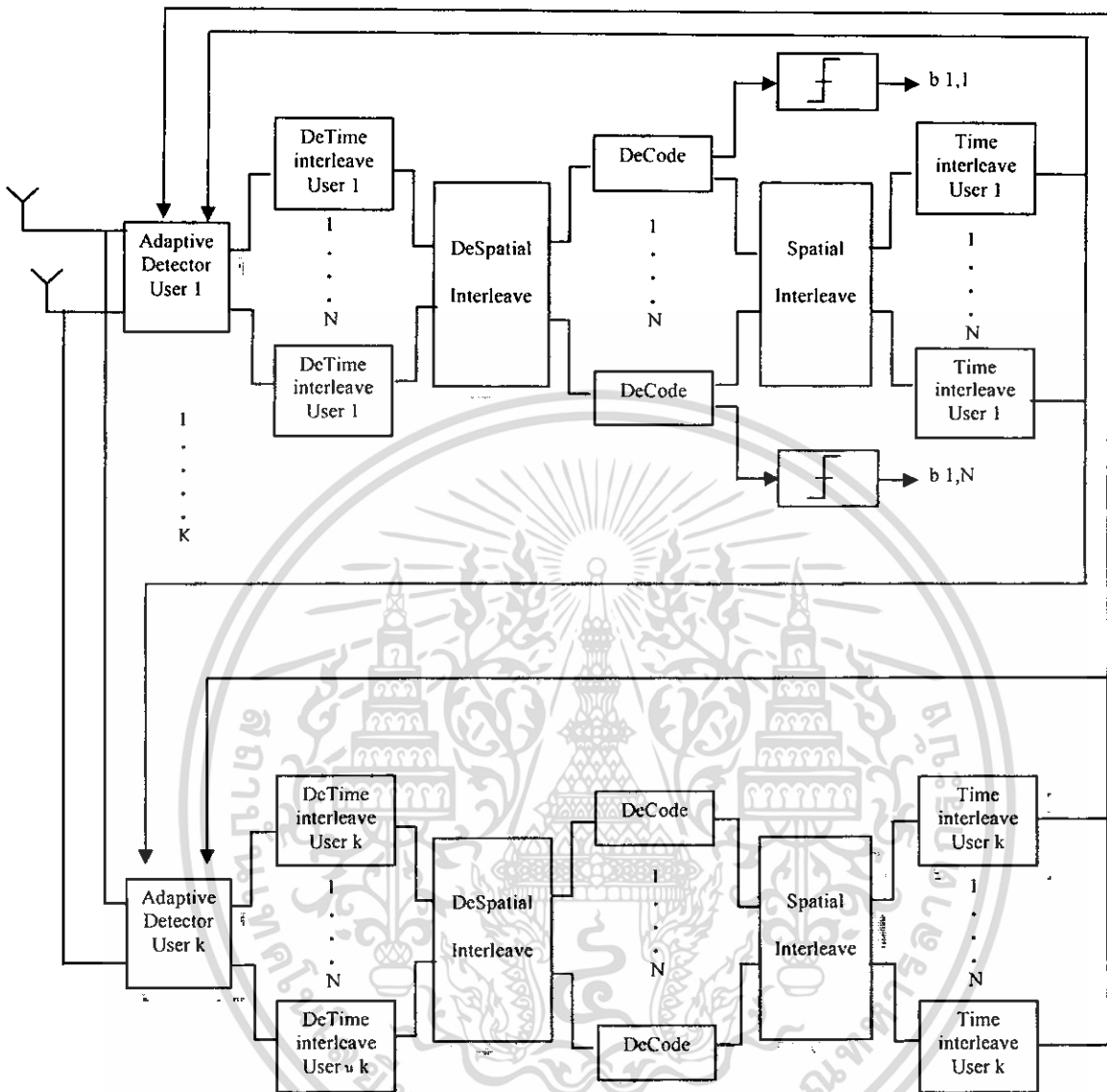
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบภาครับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative Detector)

แนวคิดหลักของการทำงานของ ตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ คือปรับค่าตัวแปรภายใน ตัวรับสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุด โดยปกติสัญญาณที่ได้รับมาจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) อยู่มาก ในกรณีที่เรารู้ค่าของช่องสัญญาณ การขจัดสัญญาณรบกวนสามารถทำได้โดยเครื่องรับสัญญาณในฝั่งรับนำข้อมูลที่รับมาคูณกับสัมประสิทธิ์ค่าหนึ่งซึ่งจะมีการปรับค่าเรื่อยๆเพื่อให้ใกล้เคียงกับส่วนกลับของช่องสัญญาณ ทำให้เราได้ข้อมูลที่ถูกต้องคืนมา การปรับค่านี้ทำได้โดยนำข้อมูลที่ได้จากการคูณครั้งแรกมาเทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) แล้วนำข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ โดยวนเป็นจำนวนหลายรอบ ก็จะได้ค่าส่วนกลับที่ใกล้เคียงกับสภาพช่องสัญญาณมากที่สุด ซึ่งในระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) นั้นสัญญาณที่เราได้รับนอกจากจะประกอบด้วยสัญญาณที่เราพิจารณาแล้วยังประกอบด้วยสัญญาณของผู้ใช้งานรายอื่นในระบบด้วย ซึ่งเราจะต้องนำมาหักลบออกจากสัญญาณที่เราพิจารณาด้วย จำนวนรอบของการป้อนย้อนกลับยิ่งมากก็จะยิ่งทำให้สัญญาณที่ได้รับดีขึ้น

ตัวอย่างในรูปที่ 3.2 เป็นการพิจารณาการทำงานของ 1 ผู้ใช้งาน ซึ่งจะมีการตรวจจับสัญญาณของผู้ใช้งานรายอื่นด้วย เพื่อให้มีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ไปยังสัญญาณของผู้ใช้งานที่พิจารณา เพื่อหักล้างสัญญาณรบกวนออก ดังนั้นสัญญาณที่เราต้องการจะมีสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้งานอื่นลดน้อยลง



รูปที่ 3.2 การตรวจจับสัญญาณของ 1 ผู้ใช้งานที่มีการป้อนข้อมูลย้อนกลับจากผู้ใช้งานอื่น

จากรูปที่ 3.2 เมื่อเสาอากาศได้รับสัญญาณมา ส่วนหนึ่งใช้เป็นสัญญาณของผู้ใช้งานที่เราต้องการ อีกส่วนหนึ่งเราจะแยกไปเพื่อหาสัญญาณของผู้ใช้งานอื่นซึ่งมีสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) แตกต่างกันออกไป

จากนั้นสัญญาณจากทั้ง 2 เสาอากาศจะถูกนำไปเข้าตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive Detector) ของแต่ละผู้ใช้งาน เมื่อเรากรองสัญญาณแล้ว จะนำสัญญาณนั้นมาทำการถอดรหัสการอินเทอร์ลีฟตามช่วงเวลา (DeTime Interleave) ของแต่ละเสาอากาศ แล้วนำสัญญาณที่ได้มาทำการถอดรหัสสเปเชียลอินเทอร์ลีฟ (DeSpatial Interleave) เมื่อทำการถอดรหัสการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเตอร์ลีฟ (DeInterleave) เสร็จทั้งหมดแล้ว สัญญาณแต่ละลำดับชั้น (Layer) จะถูกนำมาทำการดีมอดูเลชัน (Demodulation) และ ทำการถอดรหัส (Decode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution) เพื่อทำการตรวจสอบบิตที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นและทำการแก้ไขสัญญาณ ถ้าความผิดพลาดนั้นเป็นความผิดพลาดขนาดเล็ก

สัญญาณส่วนหนึ่งจะถูกนำไปหาอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เพื่อพิจารณาว่า สัญญาณที่ได้รับนั้นดีพอที่จะออกจากการทำงานที่เทียบกับสัญญาณอ้างอิง (Training Mode) แล้วใช้เป็นข้อมูลจริงได้หรือยัง ถ้าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็จะนำข้อมูลนั้นไปเป็นสัญญาณออก (Output) ต่อไป

สัญญาณอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปทำการเข้ารหัสการอินเตอร์ลีฟ (Interleave) อีกครั้งเพื่อนำไปปรับค่าของตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive detector) ของผู้ใช้งานที่พิจารณา และยังส่งไปให้ ตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive detector) ของผู้ใช้งานรายอื่นด้วย เพื่อนำค่านี้ไปลดสัญญาณรบกวนของผู้ใช้งานรายอื่น

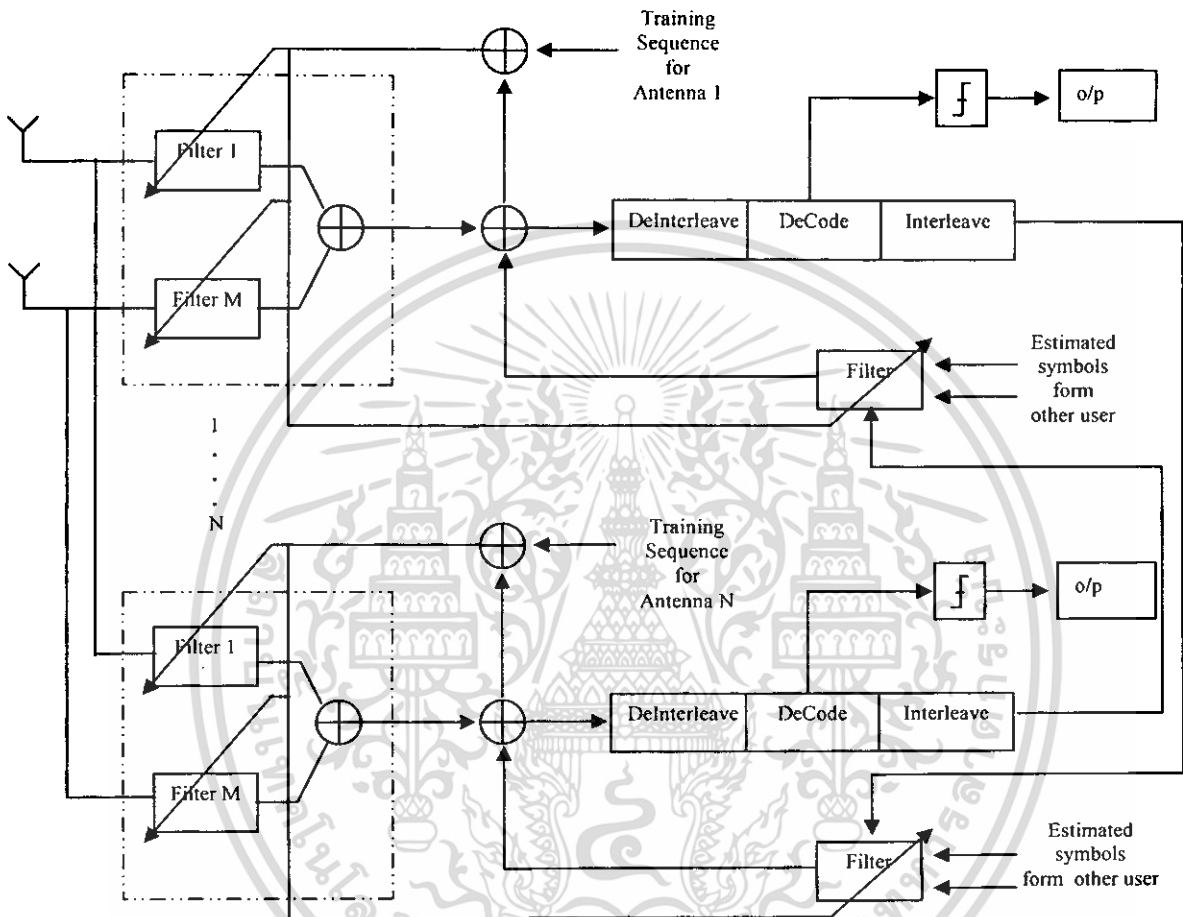
สิ่งที่ทำให้เรารู้ได้ว่าสัญญาณนี้เป็นของผู้ใช้งานรายใด เราได้จากสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) ที่ผู้ส่งกับผู้รับจะต้องรู้ด้วยกันทั้งคู่ ในการสื่อสารในช่วงแรกๆ สัญญาณที่ได้รับมาโดยมากจะไม่ตรงกับสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) เนื่องจากไม่มีข้อมูลในการปรับ ตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive detector) มาก่อน จะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นมากแต่เมื่อใช้สัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) เป็นตัวอ้างอิงในการปรับตัวรับสัญญาณ ไปเรื่อยๆ ประกอบกับข้อมูลที่ได้จากผู้ใช้งานและเสอากาศอื่นมีความถูกต้องมากขึ้น สัญญาณที่ผิดพลาดจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ

เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง สัญญาณที่ผิดพลาดจะมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การปรับตัวรับสัญญาณจะไม่ใช้ข้อมูลจากสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการส่งสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) แต่จะใช้ข้อมูลจากตัวผู้รับเอง ผู้ใช้งานอื่น และเสอากาศอื่นอยู่ การทำงานจะเป็นเช่นนี้อยู่ช่วงเวลาหนึ่งแล้วจะมีการส่ง สัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) มาอีก เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าค่าที่ปรับ ตัวรับสัญญาณ (Detector) ยังใช้ได้หรือไม่ ถ้ายังดีอยู่เวลาที่ใช้ในการทำงานโดยมี สัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) อยู่จะใช้เวลาน้อยลง ถ้าค่าที่ปรับไว้ไม่สามารถทำหน้าที่ได้ดี การทำงานในช่วงที่มี สัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) ก็จะใช้เวลานาน และก็จะทำไปจนกว่าจะถึงค่าที่ยอมรับได้ การทำงานนี้จะวนไปเรื่อยๆตลอดการส่งข้อมูล

ตัวอย่างในรูปที่ 3.3 เป็นตัวรับสัญญาณของ 1 ผู้ใช้งาน โดยเราจะมองภายใน 1 ผู้ใช้งาน ว่า มีวิธีการกำจัด สัญญาณรบกวน ที่เกิดจากเสอากาศของตัวเองจากการสื่อสารแบบ MIMO โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) ของแต่ละเสาอากาศเพื่อห้กำลังสัญญาณรบกวนออก ดังนั้นเราจะได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 3.3 การตรวจจับสัญญาณของ 1 ผู้ใช้งานที่มีการป้อนข้อมูลย้อนกลับจากเสาอากาศอื่น

จากรูปที่ 3.3 เมื่อตัวรับได้รับสัญญาณมา ส่วนหนึ่งใช้เป็นสัญญาณของเสาอากาศที่เราต้องการ อีกส่วนหนึ่งเราจะแยกไปเพื่อหาสัญญาณของเสาอากาศอื่นที่เป็นสัญญาณรบกวน ซึ่งมีสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) ต่างกันออกไป

สัญญาณจาก 2 เสาอากาศจะผ่านตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive filter) 2 ตัว ซึ่งในครั้งแรกจะยังไม่มีการปรับค่าใดๆ แล้วนำสัญญาณจาก 2 เสาอากาศที่ผ่านตัวกรองสัญญาณ (Filter) แล้วรอให้ข้อมูลส่งมาครบทั้งเฟรม (Frame) ก่อน เพื่อให้สามารถทำกระบวนการถอดรหัส อินเตอร์ลีฟ (Interleave) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นส่วนหนึ่งจะนำไปทำการถอดรหัสการอินเทอร์ลีฟตามช่วงเวลา (DeTime Interleave) จากนั้นจะทำการถอดรหัสสเปเชียลอินเทอร์ลีฟ (DeSpatial Interleave) แล้วทำการถอดรหัสข้อมูล (Decode) จากนั้นจะนำไปหาอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ถ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็จะนำข้อมูลออกไปเป็นสัญญาณออก (Output) ต่อไป แต่ยังมีข้อมูลส่วนหนึ่งที่ถูกนำไปทำการเข้ารหัสอินเทอร์ลีฟ (Interleave) แล้วส่งไปยังเสาอากาศอื่น เพื่อให้เสาอากาศอื่นนำสัญญาณของเสาอากาศที่เราพิจารณาไปลด สัญญาณรบกวน เพราะเนื่องจากสัญญาณของเสาอากาศที่พิจารณา จะไปเป็นสัญญาณรบกวนของเสาอากาศอื่น

อีกส่วนหนึ่งจะนำไปเทียบกับค่าสัญญาณอ้างอิง (Training Sequence) เพื่อทำการปรับค่าให้กับตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive filter) ทั้ง 2 ตัวของเสาอากาศนี้ และไปปรับค่าของตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Adaptive filter) ที่จะกรองสัญญาณจากเสาอากาศอื่นที่รับมาเพื่อลด สัญญาณรบกวน จากเสาอากาศอื่น

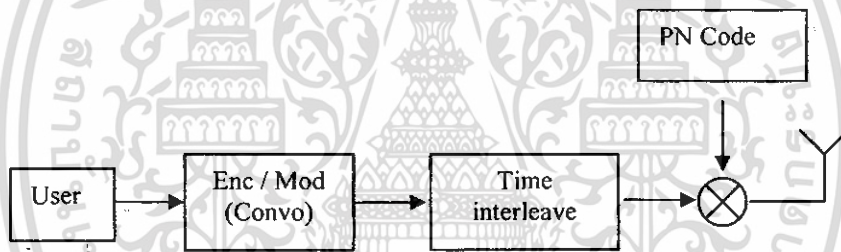
เราจะเห็นว่าการลดสัญญาณรบกวนเมื่อพิจารณาที่ 1 เสาอากาศ จะมีการลดทั้งจาก ผู้ใช้งานอื่นและจากเสาอากาศอื่นที่ส่งข้อมูลมาคนละส่วน โดยการลบสัญญาณข้อมูลที่ป้อนย้อนกลับจากเสาอากาศอื่นและผู้ใ้รายอื่น

3.2 การออกแบบภาคส่งสัญญาณ (Transmitter)

ภาคส่งสัญญาณนั้นจะออกแบบให้มีความแตกต่าง โดยแบ่งเป็นภาคส่งสัญญาณสำหรับสัญญาณขาลง (Downlink) ซึ่งหมายถึงการส่งสัญญาณจากสถานีฐานสู่เครื่องลูกข่ายซึ่งจะรวมสัญญาณจากผู้ใช้งานทุกรายส่งออกไปในช่องสัญญาณเดียวกันและภาคส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) ซึ่งหมายถึงการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่ายไปสู่สถานีฐาน ซึ่งผู้ใช้งานแต่ละรายใช้ช่องสัญญาณที่แตกต่างกันในการส่งสัญญาณ

3.2.1 ภาคส่งสัญญาณขาของ (Downlink)

ขั้นตอนในการส่งข้อมูลโดยใช้เสาอากาศตัวเดียวในการส่งแสดงด้วยขั้นตอนดังรูปที่ 3.4

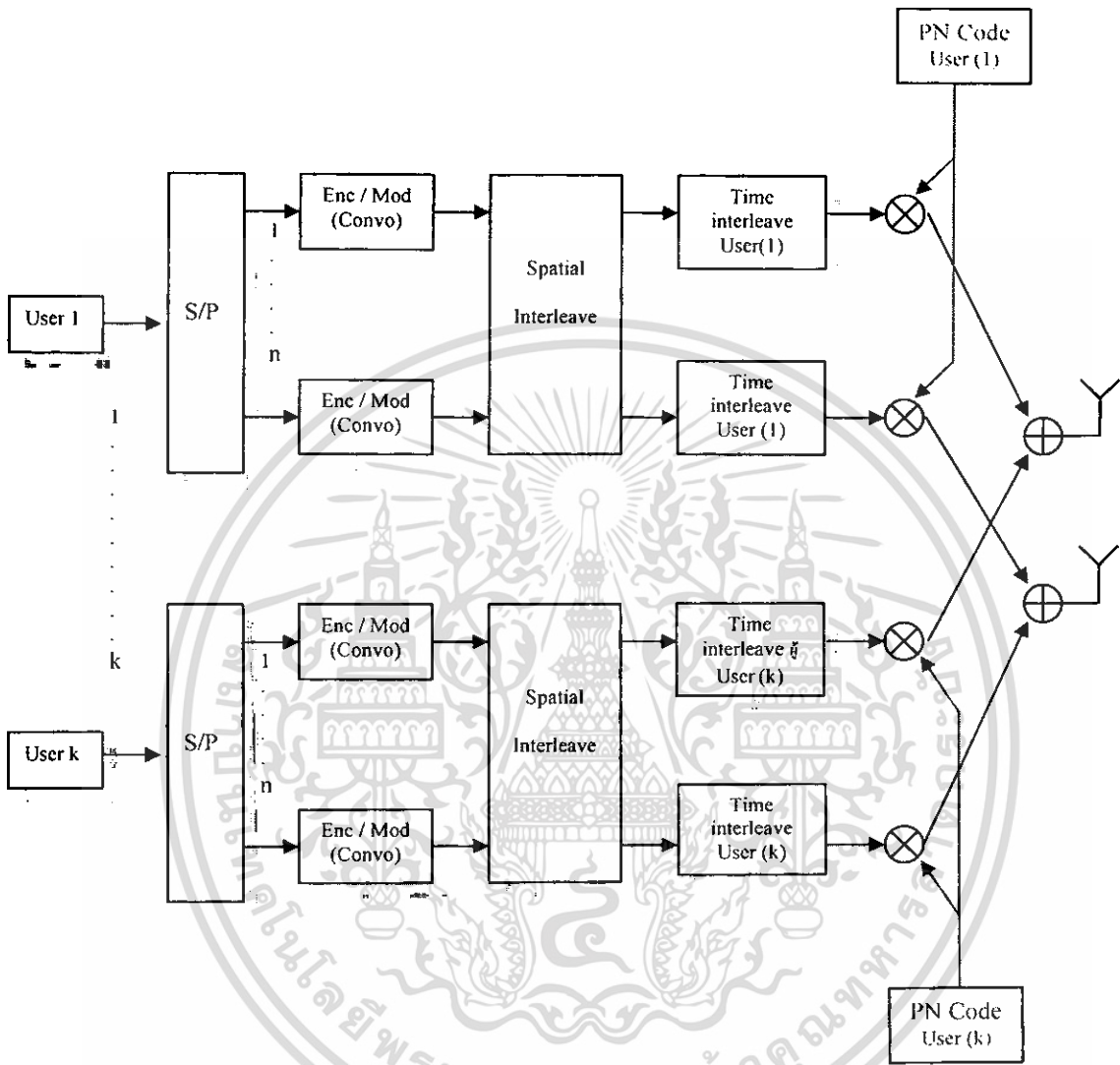


รูปที่ 3.4 โครงสร้างการทำงานของฝั่งส่งข้อมูลโดยใช้ 1 เสาอากาศในการส่ง

เมื่อสถานีส่ง (Base station) ต้องการส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งาน ข้อมูลจะถูกเข้ารหัส (Encode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution) เพื่อความปลอดภัยและเพิ่มบิตในการตรวจสอบข้อผิดพลาด จากนั้นจะมีการทำอินเตอร์ลีฟ (Interleave) หรือการวางสลับข้อมูลเพื่อป้องกันขอมูลผิดพลาดที่ต่อเนื่องเป็นแถบ ฝั่งรับจะสามารถตรวจสอบข้อผิดพลาดได้ง่ายขึ้น แล้วจึงคูณด้วยรหัส PN (พิจารณาการสื่อสารแบบซีดีเอ็มเอ) เพื่อแยกข้อมูลให้แตกต่างจากผู้ใช้งานรายอื่นในระบบ ก่อนทำการมอดูเลชัน (Modulation) เพื่อเปลี่ยนข้อมูลบิตให้เป็นคลื่นที่พร้อมทำการส่งออกไปในช่องสัญญาณ

แต่ถ้าพิจารณาภาคส่งสัญญาณที่ใช้หลายเสาอากาศในการส่งข้อมูลแล้ว จะมีความซับซ้อนมากกว่านี้ เช่นวงจรที่ใช้ 2 เสาอากาศในการส่งสัญญาณ ขั้นตอนสามารถพิจารณาจากรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างการทำงานของภาคส่งสัญญาณสำหรับขาลง (Downlink)

เมื่อสถานีส่ง (Base Station) ต้องการส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งาน 1 และผู้ใช้งาน 2 สัญญาณของแต่ละผู้ใช้งานจะถูกแบ่งออกไปเป็นระดับชั้น (Layer) ต่างๆกันตามจำนวนเสาอากาศ จากการทำงานของกระบวนการเปลี่ยนจากสัญญาณอนุกรมเป็นสัญญาณแบบขนาน (Function Serial to Parallel) เพื่อแบ่งการส่งออกไปในแต่ละเสาอากาศ

จากนั้นสัญญาณจะถูกทำการ โมดูเลชัน (Modulation) เพื่อเปลี่ยนบิตให้พร้อมทำการส่ง จากนั้นสัญญาณจะถูกเข้ารหัส (Encode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution)

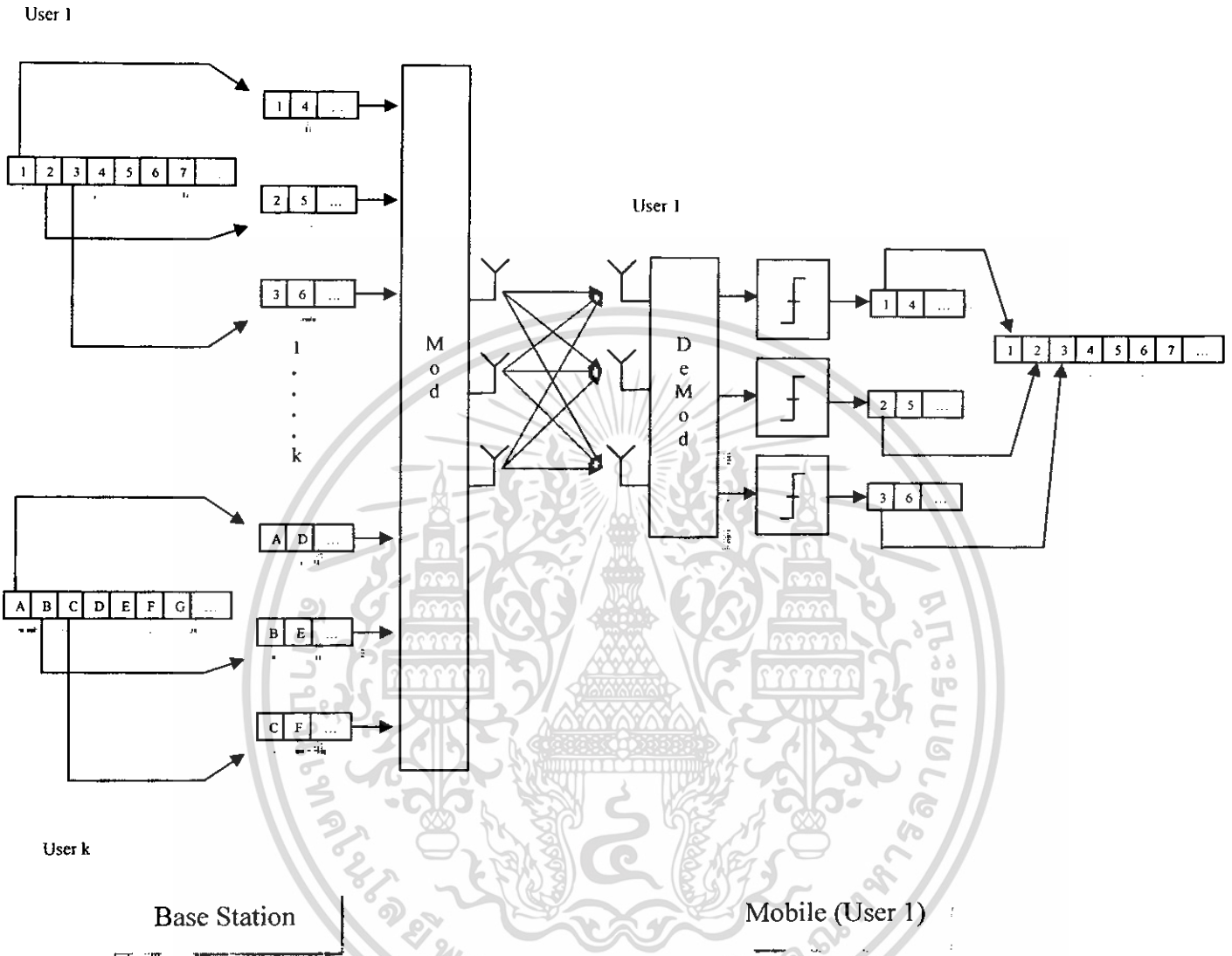
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้สัญญาณผิดพลาดน้อยลงไปอีก จะทำการสลับบิตข้อมูลที่อยู่ต่างระดับชั้น (Layer) อย่างมีรูปแบบเพื่อให้บิตกระจายกันออกไปในทุกระดับชั้น (Layer) เรียกกระบวนการนี้ว่าการเข้ารหัสแบบสเปซไทม์อินเตอร์ลีฟ (Spatial Interleave) ซึ่งจะทำให้ฝั่งรับสามารถตรวจสอบและแก้ไขบิตที่เกิดความผิดพลาดได้ง่ายขึ้น

จากนั้นจะทำการสลับบิตที่ติดกันในระดับชั้น (Layer) เดียวกันให้กระจายกันออกไปเรียกว่าการเข้ารหัสอินเตอร์ลีฟตามช่วงเวลา (Time Interleave) ซึ่งจะทำให้ฝั่งรับสามารถตรวจสอบและแก้ไขบิตที่ผิดพลาดได้ง่ายขึ้น

เนื่องจากเราใช้การสื่อสารแบบซีดีเอ็มเอ (CDMA) เราจึงใส่รหัสพีเอ็น (PN Code) ของแต่ละผู้ใช้งานเข้าไปโดยผู้ใช้งานเดียวกันจะใช้รหัสพีเอ็น (PN Code) เดียวกัน จากนั้นจึงส่งไปตามเสาอากาศ โดยระดับชั้นเดียวกันของแต่ละผู้ใช้งานจะถูกนำมารวมกันแล้วส่งไปตามเสาอากาศไปยังภาครับต่อไป

เมื่อนำภาครับและภาครับรวมกัน เราสามารถจำลองรูปแบบภาครับส่งสัญญาณที่ใช้เสาอากาศจำนวน $M \times N$ ตัวในการรับส่งแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ได้ดังรูปที่ 3.6



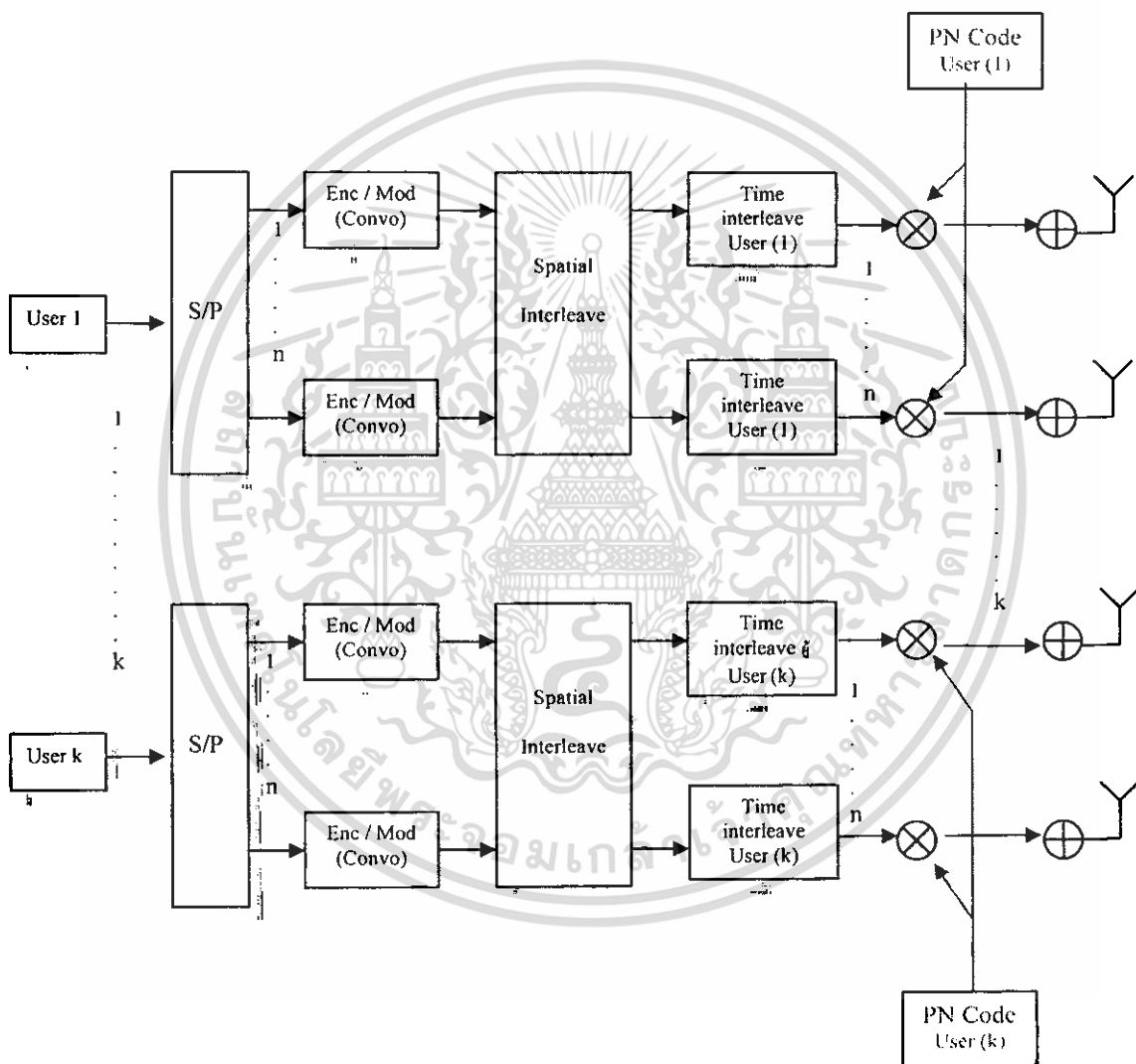
รูปที่ 3.6 โครงสร้างการทำงานของภาครับส่งสัญญาณขาออก (Downlink) สำหรับระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)

จากรูปจะเห็นได้ว่าข้อมูลของผู้ใช้งานทุกรายจะถูกรวมแล้วจึงส่งออกไปในช่องสัญญาณเดียวกัน เสาอากาศในฝั่งภาครับจะได้รับสัญญาณรวมทุกเลเยอร์ (Layer) ของผู้ใช้งานทุกราย แล้วจึงนำไปประมวลผลแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) เพื่อนำข้อมูลของผู้ใช้รายอื่นลบออกจากสัญญาณที่ต้องการรับก็จะได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ภาคส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink)

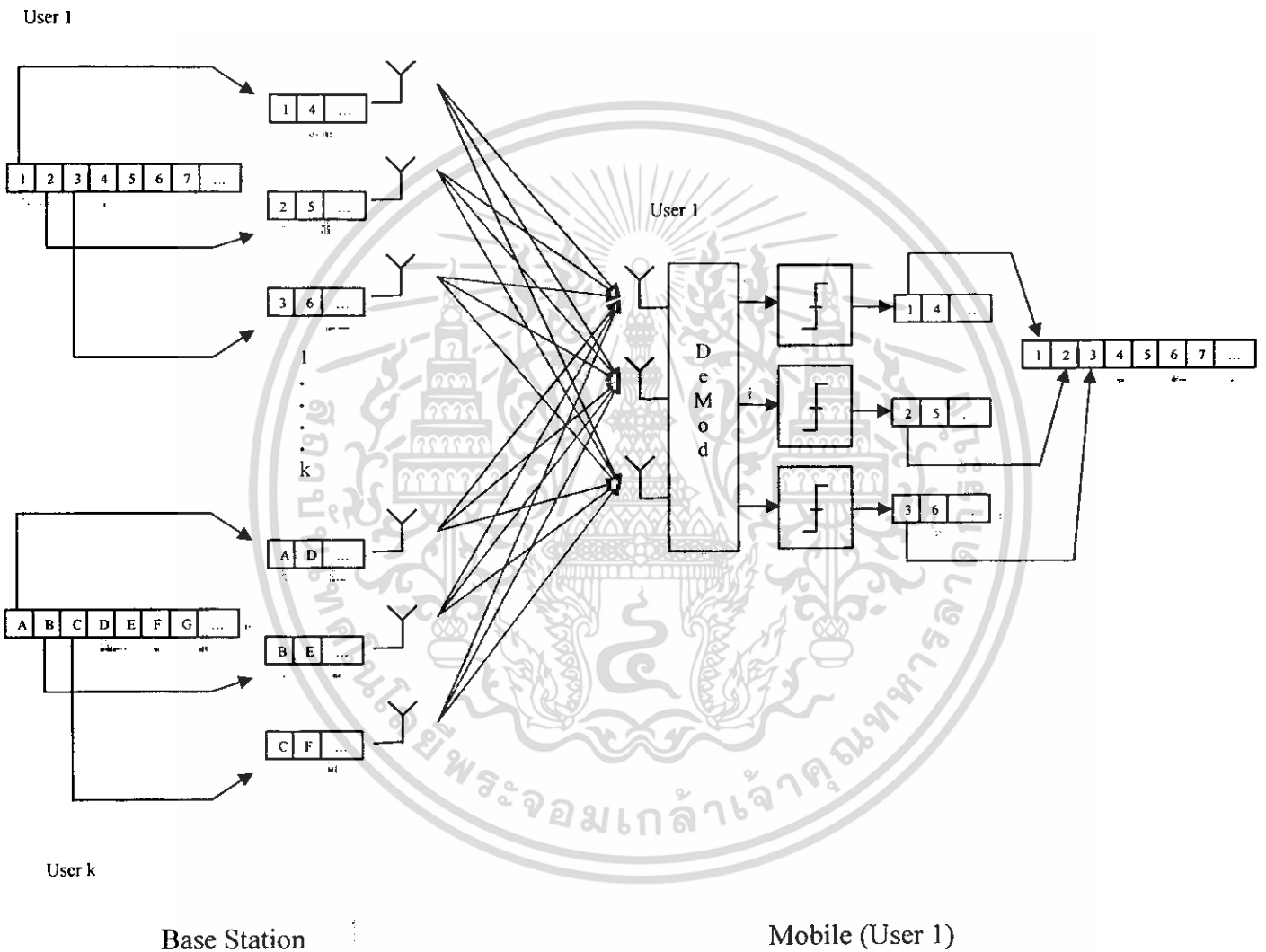
ภาคส่งสัญญาณสำหรับขาขึ้น (Uplink) นั้น มีความใกล้เคียงกับขาลง (Downlink) มาก แต่มีส่วนแตกต่างตรงที่ผู้ใช้งานในระบบแต่ละรายทำการส่งข้อมูลให้กับสถานีอย่างเป็นอิสระ ช่องสัญญาณที่ใช้จึงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของภาคส่งสัญญาณสำหรับขาขึ้น (Uplink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าผู้ใช้แต่ละรายใช้เสาอากาศในการส่งข้อมูลเป็นอิสระจากกันเมื่อเปรียบเทียบกับขาลง (Downlink) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ส่วนภาพที่ 3.8 แสดงการทำงานของภาครับส่งสัญญาณสำหรับขาขึ้น (Uplink) จะเห็นว่าการส่งข้อมูลในขาขึ้นนั้นประกอบด้วยช่องสัญญาณย่อยจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.8 โครงสร้างการทำงานของภาครับส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) สำหรับระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลอง

4.2 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity)

จำลองการทำงานของตัวรับสัญญาณแบบปรับค่าได้ โดยมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการใช้เสาอากาศในการรับส่งสัญญาณเพียง 1 ตัว กับการใช้เสาอากาศในการรับส่งสัญญาณจำนวน $M \times N$ ตัว เพื่อทดสอบว่าการสื่อสารแบบมีการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) นั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าหรือไม่ เนื่องจากระบบการสื่อสารมี 2 ทาง ดังนั้นจึงแสดงผลทั้งในรูปแบบของการสื่อสารขาลง (Downlink) และการสื่อสารขาขึ้น (Uplink)

จุดประสงค์การทดลอง

ทดสอบการเพิ่มไควเวอร์ซิตี (Diversity) ของเสาอากาศโดยการส่งข้อมูลแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าการส่งข้อมูลแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกทางเดียว (SISO) เพียงใด

ขั้นตอนการทดลอง

เนื่องจากการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบผลของไควเวอร์ซิตี (Diversity) จากระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ของการสื่อสารทั้งสองทาง จึงกำหนดรูปแบบที่ใช้ทดลองโดยจะทำในส่วนของ การสื่อสารขาลงก่อน คือ 2 ผู้ใช้งาน 1 เสาอากาศในการส่งและใช้ 1 เสาอากาศในการรับสัญญาณ หรือก็คือการส่งแบบสัญญาณเข้าและสัญญาณออกทางเดียว (SISO) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่ค่อยซับซ้อนเมื่อเทียบกับรูปแบบการส่งอื่นๆ

จากนั้นทำการทดลองเพิ่มเพื่อใช้เปรียบเทียบโดยการใช้ 1 เสาอากาศในการส่ง และ 2 เสาอากาศในการรับสัญญาณ ซึ่งก็คือการส่งแบบสัญญาณเข้าทางเดียวและสัญญาณออกหลายทาง (SIMO) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการสื่อสารเนื่องจากเมื่อเรามีไควเวอร์ซิตี (Diversity) ที่มากขึ้นจากการใช้เสาอากาศในการรับสัญญาณเพิ่มขึ้น

ในการทดลองสุดท้ายที่ใช้เปรียบเทียบคือการใช้ 2 เสาอากาศในการส่ง และ 2 เสาอากาศในการรับสัญญาณ ซึ่งก็คือการส่งแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO)

เมื่อทำการทดลองของการสื่อสารขาลง (Downlink) เสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วในขั้นตอนต่อไปจะทำในส่วนของ การสื่อสารขาขึ้น (Uplink) ต่อ เนื่องจากไม่ได้ต้องการที่จะเปรียบเทียบระหว่าง การสื่อสารขาขึ้นกับการสื่อสารขาลง ดังนั้นการกำหนดตัวแปรบางตัวแปรไม่จำเป็นต้อง

เหมือนกันแต่ให้รูปแบบการส่งสัญญาณยังเป็นรูปแบบเดิมก็เพียงพอ การทดลองนี้เราจะกำหนดให้จำนวนผู้ใช้เป็น 3 ผู้ใช้ โดยมีการส่งแบบสัญญาณเข้าทางเดียวและออกทางเดียว (SISO), การส่งแบบสัญญาณเข้าทางเดียวและออกหลายทาง (SIMO) โดยจะใช้เสาอากาศภาครับเป็น 3 เสาอากาศ และ ระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) โดยจะใช้เสาอากาศทั้งภาคส่งและภาครับเป็นอย่างละ 3 เสาอากาศ

จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าของอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เมื่อเทียบกับแกนอนที่แสดงอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) โดยจะแบ่งกราฟเป็น 2 กราฟคือ กราฟแสดงการสื่อสารขาขึ้น (Uplink) กับกราฟแสดงการสื่อสารขาลง (Downlink) ในแต่ละกราฟจะแสดงค่าของ การส่งทั้งแบบการส่งแบบสัญญาณเข้าทางเดียวและออกทางเดียว (SISO), การส่งแบบสัญญาณเข้าทางเดียวและออกหลายทาง (SIMO) และ การส่งแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) เพื่อเปรียบเทียบผลของการมีไดเวอร์ซิตี (Diversity) ที่เพิ่มขึ้น

4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของการวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative)

จำลองการทำงานของตัวรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า โดยกำหนดจำนวนเสาอากาศในการรับสัญญาณ, จำนวนผู้ใช้ และจำนวนเสาอากาศในการส่งให้เท่ากันในแต่ละรูปแบบการสื่อสาร แต่มีจำนวนรอบที่มีการป้อนข้อมูลกลับไม่เท่ากัน เนื่องจากการสื่อสารมี 2 ทาง ดังนั้นจึงแสดงผลทั้งในรูปแบบของการสื่อสารขาลง (Downlink) และการสื่อสารขาขึ้น (Uplink)

จุดประสงค์การทดลอง

ทดสอบว่าการป้อนข้อมูลกลับแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) สามารถลดสัญญาณรบกวน (Noise) ได้อย่างมีนัยสำคัญเพียงใดเมื่อเทียบกับการป้อนข้อมูลย้อนกลับเพียงครั้งเดียว

ขั้นตอนการทดลอง

เนื่องจากการส่งแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นทั้งจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) และสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้หลายคน (MAI) ดังนั้นเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเราจึงจำเป็นต้องทำการลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออกไปโดยการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) โดยให้เครื่องรับสัญญาณปรับค่าสัญญาณไปเรื่อยๆ

ในการสื่อสารขาลง ทำการกำหนดค่า จำนวนเสาอากาศในการส่งสัญญาณเป็น 2 ตัว เสาอากาศในการรับ 2 ตัว และมีจำนวนผู้ใช้ 2 คน โดยทำการตั้งค่าจำนวนการป้อนข้อมูลย้อนกลับเป็นจำนวนทั้งหมด 5 รอบ เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการวนแต่ละรอบ

ส่วนในการสื่อสารขาขึ้น ปรับให้แตกต่างโดยการเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานและเสาอากาศในการรับส่งสัญญาณ โดยทำการกำหนดค่าเสาอากาศในการส่งสัญญาณ 3 ตัว เสาอากาศในการรับ 3 ตัว และมีจำนวนผู้ใช้ 3 คน และทำการตั้งค่าจำนวนการป้อนข้อมูลย้อนกลับทั้งหมด 5 รอบเช่นเดียวกับการสื่อสารขาลง

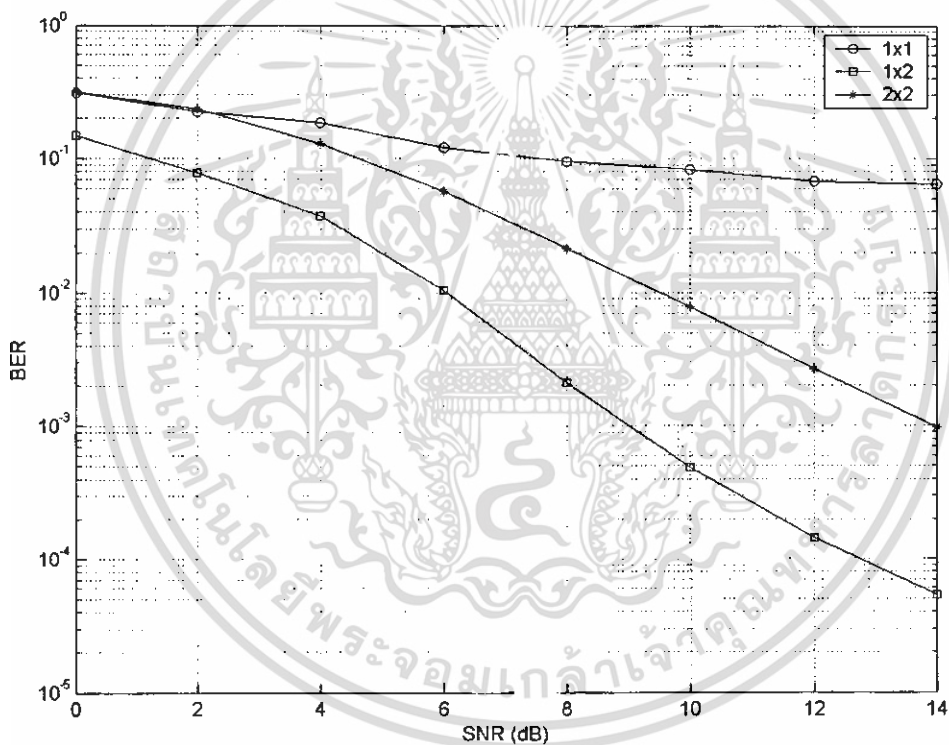
จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าของอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เมื่อเทียบกับอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ในแกนนอนเหมือนในการทดลองที่ 1 โดยจะแบ่งกราฟเป็น 2 กราฟคือ กราฟแสดงการสื่อสารขาลง (Downlink) กับกราฟแสดงการสื่อสารขาขึ้น (Uplink) ในแต่ละกราฟจะแสดงผลการเปรียบเทียบของจำนวนรอบในการป้อนข้อมูลวนกลับ



บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองตอนที่ 1 เราต้องการศึกษาผลของการไดเวอร์ซิตี (Diversity) ที่มีต่อประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณทั้งการส่งสัญญาณขาลง (Downlink) และการส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) หลังจากการจำลองผล (Simulate) ด้วยโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) แล้ว ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.1

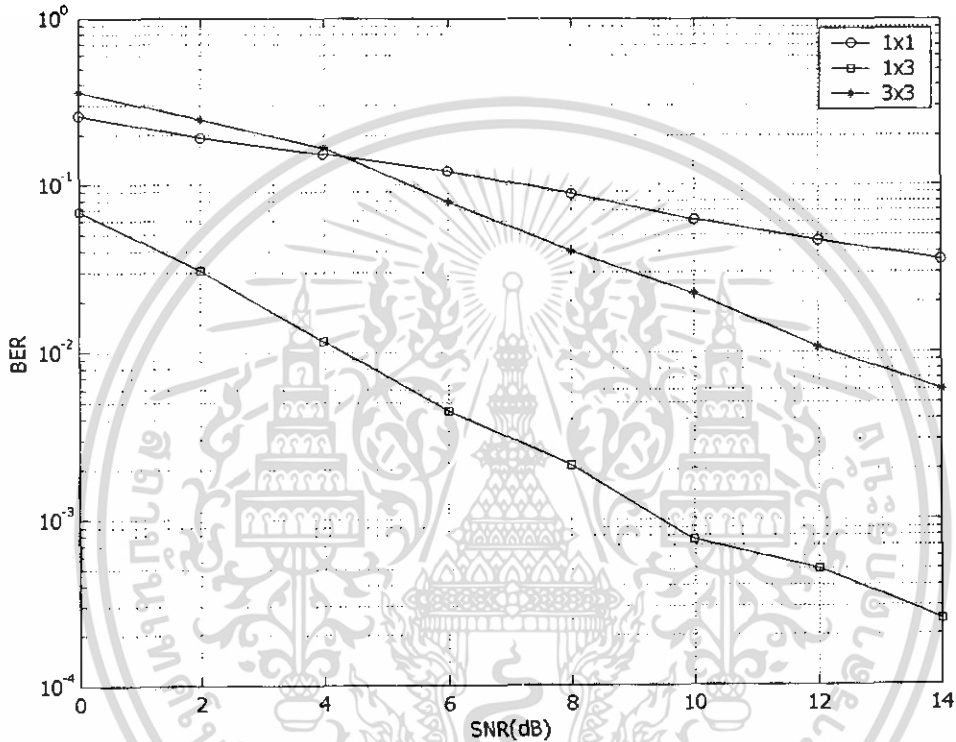


รูปที่ 5.1 (ก) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการทำไดเวอร์ซิตี (Diversity) สำหรับการส่งสัญญาณขาลง (Downlink)

จากรูปที่ 5.1 (ก) กราฟทั้งสามเส้น พบว่าการส่งและรับสัญญาณด้วยเสาอากาศตัวเดียว ให้ อัตราความผิดพลาดบิต (BER) สูงสุด เนื่องจากไม่มีไดเวอร์ซิตีเกน (Diversity Gain) แต่ถ้าทำการส่งสัญญาณด้วยเสาอากาศตัวเดียว แต่รับสัญญาณด้วยเสาอากาศ 2 ตัว จะให้อัตราความผิดพลาดบิตต่ำที่สุด ข้อที่น่าสังเกตคือ การรับและส่งสัญญาณด้วยเสาอากาศ 2 ตัว จะให้ประสิทธิภาพที่แยกจากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งสัญญาณด้วยเสาอากาศตัวเดียว แต่รับสัญญาณด้วยเสาอากาศส่ง 2 ตัว เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของเสาส่งจะเกิดสัญญาณรบกวนระหว่างเสาอากาศอื่นเนื่องจากช่องสัญญาณร่วม (CCI)

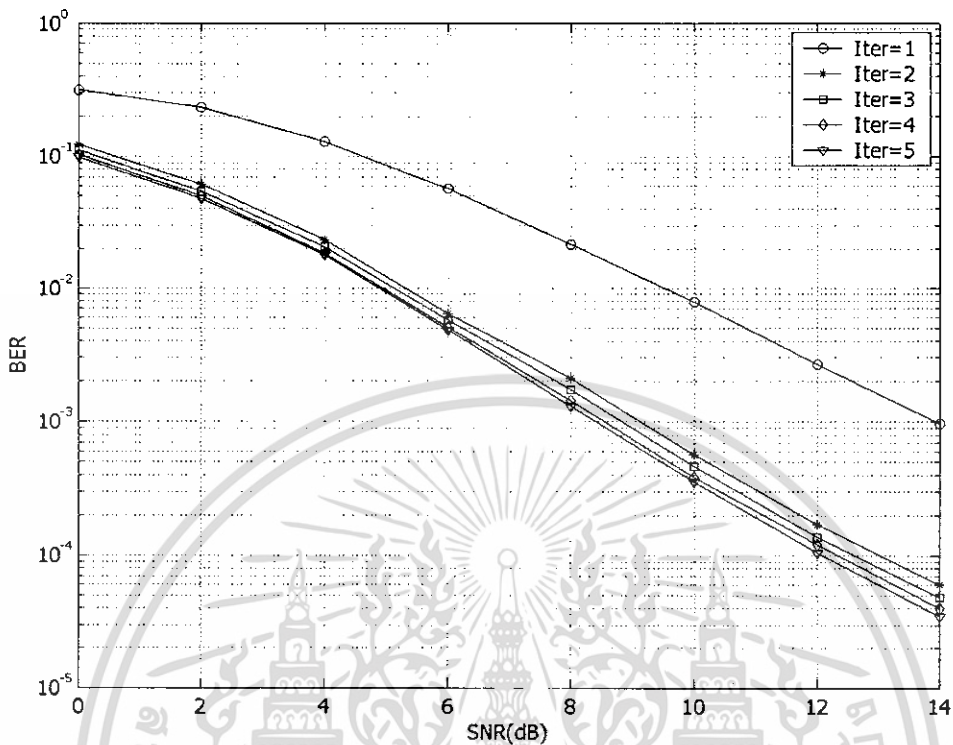
สำหรับผลการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณของการส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) ให้ผลเช่นเดียวกับการส่งสัญญาณขาลง (Downlink) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ข)



รูปที่ 5.1 (ข) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการทำไควเวอร์ซิตี (Diversity) สำหรับการส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink)

5.2 สรุปผลการทดลองที่ 2

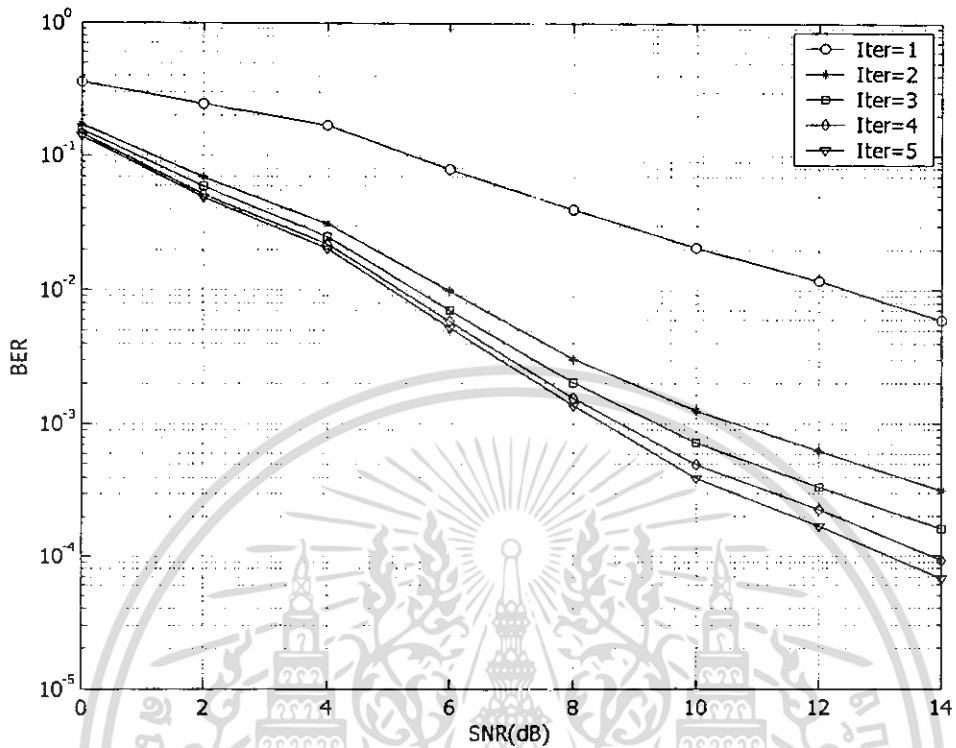
จากการทดลองตอนที่ 2 เราต้องการศึกษาผลของการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) ที่มีต่อประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณทั้งการส่งสัญญาณขาลง (Downlink) และการส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) หลังจากการจำลองผล (Simulate) ด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) แล้ว ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 (ก) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) สำหรับการส่งสัญญาณขาลง (Downlink)

จากรูปที่ 5.2 (ก) แสดงให้เห็นถึงผลของการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) จำนวน 5 รอบ สำหรับการส่งสัญญาณขาลง (Downlink) ที่ใช้เสาอากาศในการรับส่งสัญญาณ 2 ตัว จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการป้อนข้อมูลย้อนกลับมีส่วนปรับปรุงอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ให้มีค่าลดลง โดยเฉพาะการป้อนกลับครั้งที่ 2 ส่วนการป้อนข้อมูลย้อนกลับในรอบต่อไปแม้จะยังให้ผลที่ดีขึ้นแต่ BER ลดลงในอัตราที่ช้ากว่า จึงควรเลือกจำนวนรอบการป้อนกลับให้มีความเหมาะสม

สำหรับผลการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณของการส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink) ให้ผลเช่นเดียวกับการส่งสัญญาณขาลง (Downlink) ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ข)



รูปที่ 5.2 (ข) กราฟเปรียบเทียบสัญญาณจากการป้อนข้อมูลวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative) สำหรับการส่งสัญญาณขาขึ้น (Uplink)

จากการทดลองทั้งสองตอนแสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องรับแบบวนซ้ำปรับค่า (Adaptive Iterative Detector) สำหรับระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ให้ประสิทธิภาพของการรับส่งสัญญาณที่น่าพอใจ โดยสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ลงได้จากการทำไดเวอร์ซิตีทั้งทางเวลาและสเปซ (Space-Time Diversity) นอกจากนี้เมื่อมีการนำกระบวนการป้อนข้อมูลย้อนกลับแบบปรับค่าได้ (Adaptive Iterative) มาช่วยในการขจัดสัญญาณรบกวนทั้งจากเสาอากาศข้างเคียง (CCI) และผู้ใช้งานอื่นในระบบ (MAI) จะยังทำให้สัญญาณที่ได้รับดีขึ้น โดยดูจากค่า BER ที่ลดลง

ข้อสังเกตอีกประการจากกราฟคือสัญญาณข้อมูลที่รับได้จากการสื่อสารขาลง (Downlink) จะดีกว่าสัญญาณที่ได้รับในกรณีของการสื่อสารขาขึ้น (Uplink) ทั้งนี้เนื่องจากการส่งข้อมูลจากสถานีฐานสู่ผู้ใช้เป็นแบบซิงโครนัส (Synchronous) ในขณะที่การส่งข้อมูลจากผู้ใช้ไปสถานีฐานเป็นแบบอซิงโครนัส (Asynchronous) ทำให้การส่งข้อมูลขาขึ้นมีสัญญาณรบกวน และการหน่วงเวลาเกิดขึ้นมากกว่าการส่งสัญญาณขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

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

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

Savo Glisic.2004. **Advanced wireless communications : 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
communications**.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