

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบการเข้ารหัส BCH
ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้การเข้าถึงแบบ DS/CDMA

PERFORMANCE ANALYSIS OF BCH
IN WIRELESS ATM SYSTEM USING DS/CDMA



สิริกานต์ ชูเชิด
SIRIKAN CHOCHERD

เลขหนังสือ.....
เลขทะเบียน 41512
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2545

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-472-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PERFORMANCE ANALYSIS OF BCH
IN WIRELESS ATM SYSTEM USING DS/CDMA**



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

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ISBN 974-648-472-9 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบการเข้ารหัส BCH ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้การเข้าถึงแบบ DS/CDMA
นักศึกษา	นางสาวศิริกานต์ ชูเชิด
รหัสประจำตัว	42061024
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิริชิวภาค

บทคัดย่อ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบการเข้ารหัสแบบ BCH ในระบบ ATM ไร้สาย ที่ใช้ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบ DS/CDMA บนช่องสัญญาณเฟดดิ้งนาคาอามีหลายวิถี โดยใช้การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟสฐานสอง ส่วนทางด้านรับใช้แบบจำลองเครื่องรับแบบเรค รวมทั้งมีการเข้ารหัสแบบ BCH เพื่อลดผลของการเกิดเฟดดิ้งของสัญญาณ และลดความผิดพลาดของบิตข้อมูล และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างระบบที่ทำการเข้ารหัส BCH และระบบที่ไม่ได้เข้ารหัส โดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของบิตข้อมูล ค่าความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหาย และค่าอัตราที่เชลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเสริมเฟดดิ้งแบบนาคาอามี และจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคที่มากขึ้น ทำให้ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของบิตมีค่าลดลงส่งผลให้ค่าความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหาย และอัตราที่เชลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายลดลงด้วย และหากระบบทำการเข้ารหัสด้วยรหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดได้จำนวนมากขึ้น ก็จะทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นด้วย

Thesis Title	Performance Analysis of BCH in Wireless ATM System using DS/CDMA
Student	Miss Sirikan Choched
Student ID.	42061024
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Adviser	Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

This thesis proposes the performance analysis of BCH code in wireless ATM system using DS/CDMA over Nakagami multipath fading channel with BPSK modulation. The receiver uses the RAKE receiver and BCH code. The results compare uncoded system with coded system in term of Bit Error Probability, Cell Loss Probability and Cell Misinsertion Rate. The performance results indicate that the increment of fading parameter and the RAKE receiver branches make the system performance better. Finally, the performance of coded system that increases the error-correcting capability is better.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยการให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย ประกอบกับเอื้ออำนวยห้องวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ จาก รศ.ดร.สุวิพล ลิทธิชีวภาค ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ศิริจันทร์ ชูเชิด ที่ได้อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ครูและอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้กับผู้วิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษา พร้อมทั้งช่วยเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศิริกานต์ ชูเชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
บทที่ 2 การส่งข้อมูลแบบ ATM ที่ใช้วิธีการเข้าถึงแบบ CDMA.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ส่วนประกอบของเครือข่าย ATM.....	5
2.2.1 บริภัณฑ์ของผู้ใช้ (Customer Equipment: CEO).....	5
2.2.2 ตัวมัลติเพลกซ์ (Multiplexer).....	6
2.2.3 อุปกรณ์ต่อโยง (Crossconnect).....	6
2.2.4 สวิตช์ (Switch).....	7
2.2.5 การเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่าย (UNI).....	7
2.2.6 การเชื่อมต่อระหว่าง โหนดต่าง ๆ ภายในเครือข่าย (NNI).....	7
2.2.7 การเชื่อมต่อระหว่างเครือข่าย (INI).....	8
2.3 ส่วนประกอบของเซลล์ ATM.....	8
2.3.1 ส่วนควบคุมการไหลของข้อมูล (GFC).....	9
2.3.2 ส่วนระบุเส้นทางเสมือน(VPI)และส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน (VCI).....	10
2.3.3 ชนิดของข้อมูล (PT).....	11
2.3.4 ส่วนแสดงความสำคัญในการสูญเสียเซลล์ (CLP).....	11
2.3.5 ส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัว(HEC).....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 แบบจำลองอ้างอิง โพรโตคอล ATM.....	14
2.4.1 ชั้นกายภาพ (Physical Layer).....	15
2.4.1.1 ชั้นย่อย TC (Transmission Convergence).....	15
2.4.1.2 ชั้นย่อย PMD (Physical Medium Dependent).....	16
2.4.2 ชั้น ATM (ATM Layer).....	16
2.4.3 ชั้น AAL (ATM Adaptation Layer).....	17
2.4.3.1 ชั้นย่อย CS (Convergence Sublayer).....	17
2.4.3.2 ชั้นย่อย SAR (Segmentation And Resembly).....	17
บทที่ 3 การสื่อสารระบบดิจิทัลผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้ง.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 คุณสมบัติของช่องสัญญาณเฟดดิ้งหลายวิถี.....	20
3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ.....	24
3.3.1 แบบจำลองแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution).....	25
3.3.2 แบบจำลองแบบไรเซียน (Rician distribution).....	25
3.3.3 แบบจำลองแบบนาคากามิ (Nakagami distribution).....	25
3.4 เทคนิคไควอร์ซีตีในช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้ง.....	26
3.5 ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสที่ใช้กับการสื่อสาร ATM ไร้สาย.....	27
บทที่ 4 เทคนิคการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดในช่องสัญญาณ.....	31
4.1 บทนำ.....	31
4.2 รหัสบล็อกเชิงเส้น.....	31
4.2.1 การเข้ารหัสแบบ BCH.....	34
4.2.2 การถอดรหัสแบบ BCH.....	37
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลของการเข้ารหัส BCH ในระบบ ATM ไร้สาย	
ที่ใช้วิธีการเข้าถึงแบบ DS/CDMA.....	44
5.1 แบบจำลองของระบบที่ทำการวิเคราะห์.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1 แบบจำลองเครื่องส่ง.....	44
5.1.2 แบบจำลองช่องสัญญาณ.....	45
5.1.3 แบบจำลองเครื่องรับ.....	45
5.2 การหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ทำการวิเคราะห์.....	51
5.3 การหาค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหายและค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่ง ไปผิดที่หมาย.....	53
บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ.....	57
6.1 ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ.....	58
6.1.1 ผลของตัวแปรเสริมเฟดดิ้งแบบนาคากามิ.....	58
6.1.2 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค.....	59
6.1.3 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ.....	60
6.2 ค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย เมื่อการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ.....	61
6.2.1 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค.....	61
6.2.2 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ.....	62
6.3 ค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่ง ไปผิดที่หมาย เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ.....	63
6.3.1 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค.....	63
6.3.2 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ.....	64
บทที่ 7 สรุปผลการวิเคราะห์.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	68
ก. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	69
ข. โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางการจัดเส้นทางสำหรับสวิทช์ ATM จากรูปที่ 2.8.....	10
2.2 ตารางแสดงชนิดของเซลล์.....	11
2.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของผลการเปรียบเทียบส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัว กับตำแหน่งบิตที่เกิดผิดพลาด.....	13
2.4 ตารางแสดงลำดับชั้นของโพรโตคอล ATM.....	14
2.5 ชนิดของการบริการสำหรับชั้น AAL.....	17
4.1 ตารางตัวอย่างพารามิเตอร์ของรหัสแบบ BCH ที่ใช้ไพรมิทิโพลีเมนทอนดับต่ำกว่า 2^{10}	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องขาย ATM.....	5
2.2 การทำงานของตัวมัลติเพลกซ์.....	6
2.3 การทำงานของอุปกรณ์ต่อโยง.....	6
2.4 การทำงานของสวิตช์.....	7
2.5 รูปแบบของเซลล์ ATM.....	8
2.6 โครงสร้างของเซลล์ ATM (ก) เซลล์ UNI (ข) เซลล์ NNI.....	8
2.7 การควบคุมความแออัดข้อมูลโดยส่วนควบคุมการไหลของข้อมูล.....	9
2.8 การสวิตช์เซลล์ ATM จากการเชื่อมโยงขาเข้าไปยังการเชื่อมโยงขาออก.....	10
2.9 พฤติกรรมของส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวทางด้านรับ.....	12
3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารระบบดิจิทัล.....	19
3.2 ตัวอย่างการตอบสนองทางเวลาของช่องสัญญาณหลายวิถีเมื่อส่งพัลส์สัญญาณช่วงแคบ.....	20
3.3 คุณลักษณะของรูปร่างความเข้มของสัญญาณหลายวิถี.....	23
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน $\phi_c(\Delta f)$ และฟังก์ชัน $\phi_c(\tau)$	24
3.5 เครื่องรับแบบ Rake.....	27
3.6 รูปแบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส.....	28
3.7 บล็อกไดอะแกรมของการจัดลำดับโดยตรงด้านส่ง.....	29
3.8 บล็อกไดอะแกรมของการจัดลำดับโดยตรงด้านรับ.....	30
4.1 การเข้ารหัสบล็อก (n, k)	32
4.2 วงจรถอดรหัส สำหรับรหัส BCH $(7,4)$ ที่มีความสามารถแก้บิตผิดได้ 1 บิต.....	42
4.3 การเข้ารหัสแบบ shortened BCH.....	43
5.1 โครงสร้างของเซลล์ ATM ที่ถูกเข้ารหัส.....	54
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตและสัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25, N = 127, \delta = 0, L = 8$ เปรียบเทียบเมื่อ m มีค่าเป็น 0.5 และ 2.....	58
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตและสัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25, N = 127, \delta = 0, m = 2$ เปรียบเทียบเมื่อ L มีค่าเป็น 2 และ 8.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตและจำนวนผู้ใช้งานของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัสโดยที่ $E_b = 20$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ และ $L = 8$	60
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย และสัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ เปรียบเทียบเมื่อ L มีค่าเป็น 2 และ 8.....	61
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหายและจำนวนผู้ใช้งานของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัสโดยที่ $E_b = 20$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ และ $L = 8$	62
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายและสัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ เปรียบเทียบเมื่อ L มีค่าเป็น 2 และ 8.....	63
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายและจำนวนผู้ใช้งานของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัสโดยที่ $E_b = 20$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ และ $L = 8$	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การสื่อสารข้อมูลรูปแบบต่าง ๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับโลกในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะการสื่อสารไร้สาย ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งาน เมื่อนำมาใช้งานรวมกับการสื่อสารแบบ ATM ซึ่งเป็นเทคนิคการส่งข้อมูลที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพ ก็จะยิ่งรองรับความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นได้ เพราะเครือข่าย ATM สนับสนุนต่อผู้ใช้งานจำนวนมากให้สามารถส่งข้อมูลพร้อมกันได้ รวมทั้งสนับสนุนการส่งข้อมูลหลากหลายรูปแบบ ที่ความเร็วในการส่งที่ต่างกันด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ปัญหาการแย่งชิงทรัพยากรคือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณจึงเกิดขึ้นตามมา ดังนั้นจึงต้องมีระบบการเข้าถึงข้อมูลเพื่อมาแก้ปัญหา โดยระบบการเข้าถึงข้อมูลที่ได้รับความสนใจอย่างมากและใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ก็คือระบบการเข้าถึงข้อมูลหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) ด้วยวิธีการจัดลำดับโดยตรง (Direct Sequence) เพราะข้อดีของระบบนี้คือ ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ตลอดความถี่ สามารถป้องกันการแทรกแซงจากผู้ใช้งานอื่น อีกทั้งการสร้างสัญญาณรหัสทำได้ง่าย โดยใช้การคูณธรรมดา และใช้การตีมอดูเลตแบบร่วมนัย (coherent demodulation) ได้ [1] อย่างไรก็ตามการสื่อสารแบบไร้สายก็ยังได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณซึ่งมีสาเหตุมาจากการหักเห การสะท้อน และการกระเจิงสัญญาณภายในช่องสัญญาณ ทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลได้ โดยเฉพาะถ้าความผิดพลาดของข้อมูลเกิดกับส่วนของบิตข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการส่งข้อมูลภายในเครือข่าย ATM จะก่อให้เกิดปัญหาการส่งข้อมูลไปผิดที่หมายหรือเกิดการสูญหายของข้อมูลได้ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาคความผิดพลาดของข้อมูลจากช่องสัญญาณ จึงมีการเข้ารหัสช่องสัญญาณดังต่อไปนี้ ผู้ทำการวิจัยดังต่อไปนี้

Prasad, Misser และ Kegel [2] ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DS/CDMA ที่ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบเชิงเลขทางเฟสผลต่าง (Differential phase shift keying: DPSK) บนช่องสัญญาณไรเซียน (Rician) และผลที่ได้วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบแก้ความผิดพลาดไปหน้า (Forward Error Correcting: FEC) 3 รูปแบบคือ การเข้ารหัสแบบ BCH, Hamming และ Golay โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของแนวโน้มจะเป็นของบิตที่ผิดพลาด Seki, Sanada, Wang, Kato และ Bhargava [3] ทำการวิเคราะห์ระบบเครือข่ายมัลติมีเดียไร้สายที่มีการทำงานสองทาง (CDMA/TDMA) ในรูปความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาดเมื่อใช้การเข้ารหัสแบบ BCH ภายใต้ตัวแปรเสริมเฟดคิงบนช่องสัญญาณนาคากามิ (Nakagami) ส่วน Nakayama และ Aikawa [4] ได้นำ

เอกลक्षणที่มีอยู่มาใช้ในการพัฒนาระบบสื่อสารแบบไร้สายที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความปลอดภัยในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของบิตข้อมูลในส่วนหัว (header) ของเซลล์ ATM และใช้ในการชิงโครไนซ์เฟรม TDMA Aikawa, Sato และ Yoshida [5] ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบแก้ความผิดพลาดไปหน้า (FEC) ที่เปลี่ยนแปลงอัตราได้ สำหรับการสื่อสารวิทยุขั้วคิมิเดีย เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาด อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนบนช่องสัญญาณเรย์ลี (Rayleigh)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัสแบบ BCH ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้ระบบการเข้าถึงข้อมูลแบบ DS/CDMA บนช่องสัญญาณนาคาอามิ ใช้การมอดูเลตแบบเชิงเลขทางเฟสฐานสอง (BPSK) และแบบจำลองเครื่องรับแบบเรค

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาระบบการเข้าถึงข้อมูลหลายทางแบบแบ่งรหัส (CDMA) โดยวิธีการจัดลำดับโดยตรง (Direct Sequence)
- 2) เพื่อศึกษาระบบเครือข่ายสื่อสาร โหมดการส่งแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous Transfer Mode: ATM) และการเข้ารหัสข้อมูล (Coding)
- 3) เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสเปรียบเทียบกับระบบที่ทำการเข้ารหัสด้วยอัตราการเข้ารหัสค่าต่าง ๆ และศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ โดยผลของการเปรียบเทียบอธิบายในรูปของค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของบิต ค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย และค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ATM ไร้สายที่ใช้วิธีการเข้าถึงข้อมูลแบบ DS/CDMA ทางด้านส่งจะนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาเข้ารหัสแบบ BCH จากนั้นจึงนำลำดับข้อมูลไปคูณกับลำดับรหัส และทำการมอดูเลตเชิงเลขทางเฟสฐานสอง ก่อนจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณไปยังด้านรับต่อไป สำหรับช่องสัญญาณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ แบบจำลองช่องสัญญาณแบบนาคาอามิ และเนื่องจากสัญญาณที่เดินทางผ่านช่องสัญญาณมาถึงด้านรับอาจได้รับผลกระทบของการจางหายของสัญญาณที่มาจากเส้นทางต่าง ๆ กันได้ ดังนั้นเพื่อลดผลของการจางหายของสัญญาณ ด้านรับจึงใช้เครื่องรับแบบเรคที่มีการรวมอัตราส่วนสูงสุด ซึ่งจะให้อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูง และกำหนดให้สัญญาณที่รับได้ในแต่ละสาขาไควเวอร์ซิตีเป็นอิสระต่อกัน หลังจากทีสัญญาณผ่านเครื่องรับแบบเรค จะถูกทำการถอดรหัสด้วยการใช้อัลกอริทึมของ Berlekamp ซึ่งเป็นวิธีการถอดรหัสแบบ hard-decision ที่ใช้การแก้สมการทางพีชคณิตเพื่อหาตำแหน่งของบิตที่ผิดพลาด สำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสเปรียบเทียบกับระบบที่ทำการเข้ารหัสด้วยอัตราการเข้ารหัสค่าต่าง ๆ จะพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาด

พลาดของบิตข้อมูล และถ้าความผิดพลาดจากช่องสัญญาณเกิดขึ้นกับบิตข้อมูลที่บริเวณส่วนหัวของ เซลล์ ATM ซึ่งเป็นส่วนของบิตข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง จะทำให้เกิด ความเสียหายได้ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ จึงพิจารณาได้จากค่า ความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย ที่เกิดจากความผิดพลาดของบิตข้อมูลในส่วนหัวของเซลล์ และค่า อัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดที่อยู่ในส่วนหัวของเซลล์แต่ไม่สามารถ ตรวจพบได้เป็นเหตุให้เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การส่งข้อมูลแบบ ATM ที่ใช้วิธีการเข้าถึงแบบ CDMA

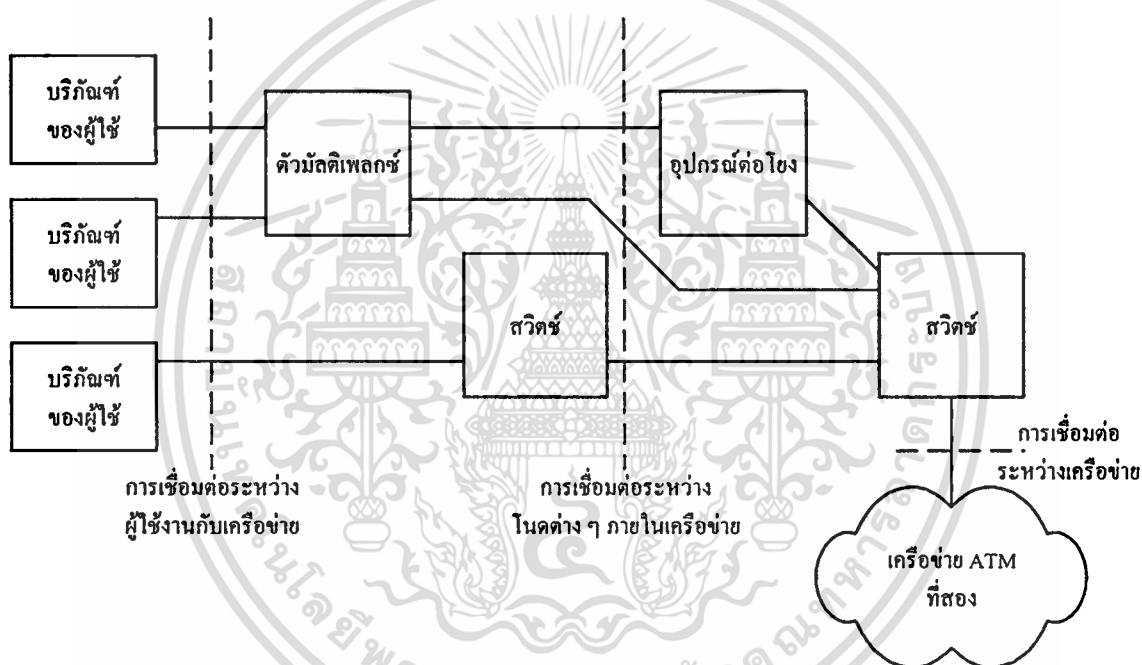
2.1 บทนำ

การสื่อสารโหมคถ่ายโอนแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous Transfer Mode: ATM) เป็นเทคนิคในการส่งข้อมูลติดต่อสื่อสารที่ทันสมัย และเป็นมาตรฐานที่กำหนดโดยหน่วยงาน International Union : Telecommunication Standard Sector (ITU-T) ซึ่งมีการกำหนดลักษณะข่าวสารที่บรรจุให้มีขนาดคงที่ ที่เรียกว่า เซลล์ (cell) ซึ่งสามารถรองรับบริการได้หลายรูปแบบ เนื่องจากข้อดีที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพ โดยเครือข่ายสื่อสาร ATM สามารถถูกใช้เพื่อสนับสนุนต่อผู้ใช้งานจำนวนมากให้สามารถส่งข้อมูลพร้อมกันได้ และยังสนับสนุนการส่งข้อมูลหลายรูปแบบ เช่น โทรศัพท์ (telephone) การส่งข้อมูล (data transmission) การเชื่อมต่อของเครือข่ายท้องถิ่น (LAN interconnection) การรับ-ส่งวิดีโอ (video transmission) และยังสนับสนุนต่อความเร็วในการส่งข้อมูลที่ต่างกันของแต่ละแอปพลิเคชันด้วย ATM มีความสามารถในการกำหนดแบ่งความจุของเครือข่ายให้กับผู้ใช้ที่แตกต่างกัน ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ทางสถิติ (statistical multiplexing) ที่เรียกว่าการสวิตช์ถ่ายทอดเซลล์ (cell relay switching) เป็นการเพิ่มจำนวนความจุของสายส่งหรือเครือข่าย โดยอาศัยข้อดีของธรรมชาติทางสถิติเมื่อมีความต้องการขนส่งข้อมูล อีกทั้งลักษณะการซิงโครนัสของระบบ ATM จะทำให้ประสิทธิภาพการส่งดียิ่งขึ้น เพราะแบนด์วิดท์ถูกใช้อย่างคุ้มค่า โดยเซลล์ข้อมูลจะถูกส่งออกไป ก็ต่อเมื่อผู้ใช้งานมีความต้องการที่จะส่ง แต่หากไม่มีข้อมูลที่จะส่ง ช่วงเวลานั้นก็จะถูกใช้งานโดยผู้ใช้งานคนอื่นได้ และหากเมื่อมีการประยุกต์นำการสื่อสารแบบ ATM มาใช้สำหรับการส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารไร้สายแล้ว ระบบการเข้าถึงหลายทางในเครือข่าย ATM จึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะถ้าเกิดมีปัญหาที่มีจำนวนของผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการใช้แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับเนื้อหาในหัวข้อที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของเครือข่าย ATM ส่วนหัวข้อ 2.3 แสดงส่วนประกอบของเซลล์ ATM และหัวข้อ 2.4 แสดงแบบจำลองอ้างอิงโพรโตคอล ATM

2.2 ส่วนประกอบของเครือข่าย ATM

เครือข่าย ATM นั้น ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน 4 ชนิด อันได้แก่ บริภัณฑ์ของผู้ใช้ (customer equipment: CEQ) สวิตช์ (switch) อุปกรณ์ต่อโยง (crossconnect) และ ตัวมัลติเพลกซ์ (multiplexer) โดยการรวมกันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ขึ้นเป็นเครือข่ายแสดงได้ในรูปที่ 2.1 และสำหรับส่วนเชื่อมต่อ (interface) มาตรฐานที่เป็นพื้นฐานของการเชื่อมต่อ ระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ มีส่วนเชื่อมต่อที่สำคัญดังนี้ คือ การเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่าย (User Network Interface: UNI) การเชื่อมต่อระหว่างโหนดภายในเครือข่าย (Network Node Interface: NNI) และการเชื่อมต่อระหว่างเครือข่าย (Inter-Network Interface: INI) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครือข่าย ATM

โดยหน้าที่ของอุปกรณ์และการเชื่อมต่อต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

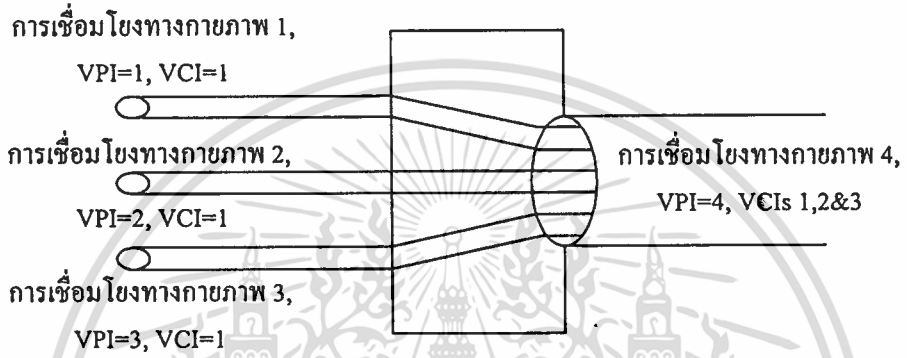
2.2.1 บริภัณฑ์ของผู้ใช้ (Customer Equipment: CEQ)

เป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการสื่อสารผ่านเครือข่าย ATM โดยรูปแบบที่รู้จักกันนั้นอยู่ในรูปของ broadband terminal adapter: B-TA หรือที่เรียกชื่อทางการค้าว่า ATM PAD และในอนาคตยังสนับสนุนแนวคิดมัลติมีเดีย ซึ่งก็คือ อุปกรณ์ที่มีความสามารถรวบรวมกลุ่มของผู้ใช้งานที่ต้องการส่งข้อมูล ที่เป็นทั้ง วิดีโอ (video) จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (electronic mail) และข้อความทางโทรศัพท์ (telephone message) ไปพร้อม ๆ กัน บนตัวกลางส่งเดียวกันได้ บริภัณฑ์ของผู้ใช้จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดต่อกับบริษัทของผู้ใช้ อีกด้านหนึ่งของเครือข่าย โดยใช้ช่องสื่อสารเสมือน (virtual channel) ที่สร้างขึ้นระหว่างการเชื่อมต่อ

2.2.2 ตัวมัลติเพลกซ์ (Multiplexer)

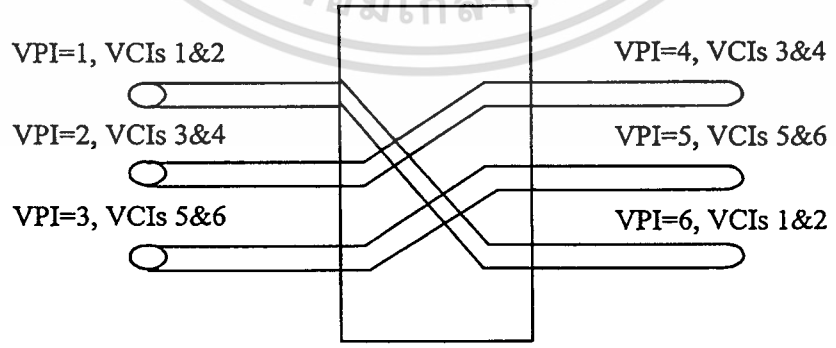
ตัวมัลติเพลกซ์ถูกใช้เพื่อให้ช่องสัญญาณเสมือนที่มาจากทางเข้าออก (UNI port) ที่แตกต่างกัน มารวมกลุ่มกัน แล้วจึงทำการส่งไปบนสายส่งทางกายภาพ (physical link) เดียวกัน นั่นคือส่งไปบนเส้นทางเสมือนเดียวกัน (virtual path) ในรูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของตัวมัลติเพลกซ์



รูปที่ 2.2 การทำงานของตัวมัลติเพลกซ์

2.2.3 อุปกรณ์ต่อโยง (Crossconnect)

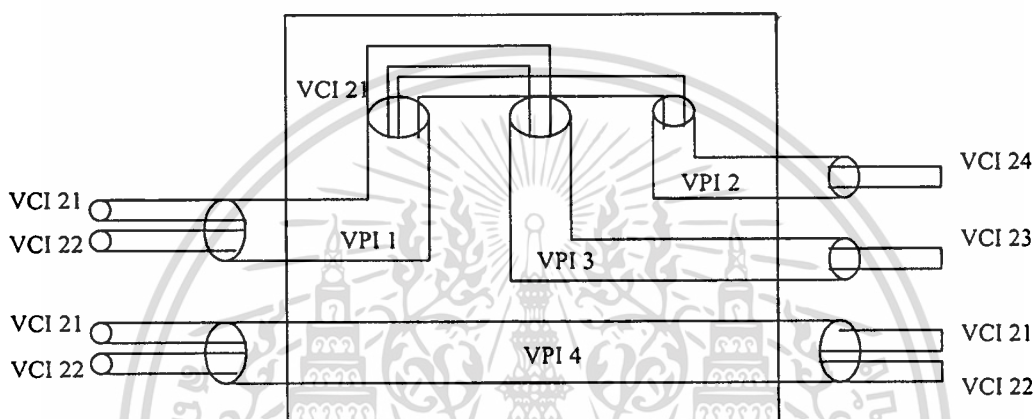
อุปกรณ์ต่อโยงเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากกว่าตัวมัลติเพลกซ์ แต่จะไม่สนใจและไม่รบกวนต่อช่องสัญญาณเสมือน ที่อยู่ภายในเส้นทางเสมือน เพียงแต่จะทำการเชื่อมต่อข้ามเส้นทางเสมือนกัน ในรูปที่ 2.3 เป็นรูปแสดงการทำงานของอุปกรณ์ต่อโยง



รูปที่ 2.3 การทำงานของอุปกรณ์ต่อโยง

2.2.4 สวิตช์ (Switch)

สวิตช์เป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนและมีความสามารถมากที่สุดในบรรดาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในเครือข่าย ATM เพราะนอกจากจะสามารถทำการเชื่อมต่อข้ามเส้นทางเสมือนได้แล้ว ยังมีความสามารถในการคัดเลือกและสลับช่องสัญญาณเสมือนที่บรรจุอยู่ภายในได้ด้วย รวมทั้งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการแปลความหมายข้อมูลในส่วนหัวของเซลล์ การแสดงปฏิกิริยาต่อผู้ใช้งาน การส่งสัญญาณไปยังเครือข่ายเพื่อสร้างการเชื่อมต่อใหม่ หรือแม้กระทั่งการยกเลิกการเชื่อมต่อปัจจุบัน ในรูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของสวิตช์



รูปที่ 2.4 การทำงานของสวิตช์

2.2.5 การเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่าย (UNI)

การเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่าย เป็นการเชื่อมต่อที่อนุญาตให้บริษัทของผู้ใช้ที่มาจากหลากหลายอุปกรณ์ สามารถสื่อสารผ่านเครือข่าย ATM ได้ โดยเป็นการต่อร่วมกัน ระหว่างบริษัทของผู้ใช้กับตัวมัลติเพลกซ์ บริษัทของผู้ใช้กับอุปกรณ์ต่อโยง หรือบริษัทของผู้ใช้กับสวิตช์

2.2.6 การเชื่อมต่อระหว่างโหนดต่าง ๆ ภายในเครือข่าย (NNI)

การเชื่อมต่อระหว่างโหนดต่าง ๆ ภายในเครือข่าย เป็นการต่อร่วมระหว่างโหนดกับโหนดที่อยู่ภายในเครือข่ายเดียวกัน หรือระหว่างเครือข่ายย่อยที่แตกต่างกัน มาตรฐานการเชื่อมต่อระหว่างโหนดต่าง ๆ ที่อยู่ภายในเครือข่ายนี้ จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการสร้างเครือข่าย ATM

2.2.7 การเชื่อมต่อระหว่างเครือข่าย (INI)

การเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายนั้น อยู่บนพื้นฐานของการเชื่อมต่อระหว่างโหนดต่าง ๆ ที่อยู่ในเครือข่าย แต่จะมีลักษณะในการรักษาความปลอดภัย การควบคุม และการจัดการกับคลื่นพาระหว่างการเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้น

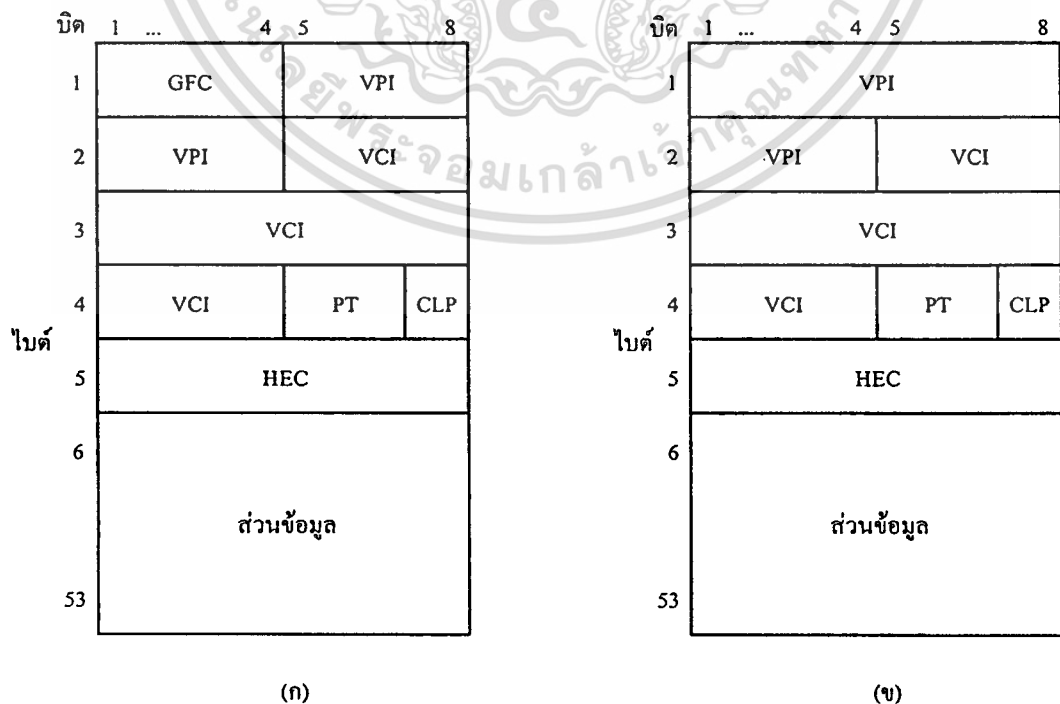
2.3 ส่วนประกอบของเซลล์ ATM

ในระบบ ATM ข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ จะถูกแบ่งออกเป็นลักษณะของแพคเกจ (packet) ซึ่งแต่ละแพคเกจจะถูกเรียกว่า เซลล์ (cell) โดยขนาดของเซลล์จะมีค่าคงที่ ตามมาตรฐาน ก็คือเซลล์ 1 เซลล์ ประกอบด้วยส่วนที่มีขนาด 48 ไบต์ (byte) ที่เป็นส่วนของข้อมูล (information) รวมกับอีก 5 ไบต์ ที่เป็นส่วนหัวของเซลล์ (header) รวมทั้งหมด 53 ไบต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปแบบของเซลล์ ATM

เซลล์ ATM แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เซลล์ UNI และเซลล์ NNI ซึ่งเซลล์ทั้ง 2 ชนิดนี้ จะมีความแตกต่างกันที่ส่วนหัวของเซลล์ โดยที่เซลล์ UNI นั้นจะมีบิต 4 บิต ที่อยู่ในไบต์แรกเป็นส่วนของ ส่วนควบคุมการไหลของข้อมูล (generic flow control: GFC) แต่ถ้าเป็นเซลล์ NNI จะกลายเป็นส่วนของ ส่วนระบุเส้นทางเสมือน (virtual path identifier: VPI) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

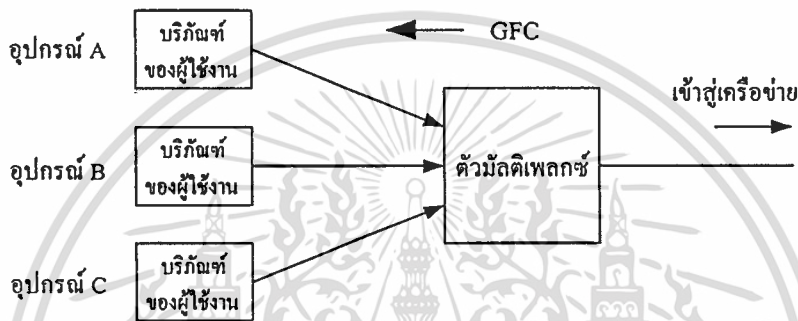


เอก **รูปที่ 2.6** โครงสร้างของเซลล์ ATM ใช้ (ก) เซลล์ UNI และ (ข) เซลล์ NNI ชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหัวของเซลล์ (cell header) ประกอบไปด้วยบิตจำนวน 40 บิต (5 ไบต์) แบ่งออกเป็น ส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.3.1 ส่วนควบคุมการไหลของข้อมูล (Generic Flow Control: GFC)

ส่วนควบคุมการไหลของข้อมูลนี้มีขนาด 4 บิต ถูกใช้เพื่อควบคุมการรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง บริภัณฑ์ของผู้ใช้กับเครือข่าย และเพื่อดูแลความเร็วบร็อยของข้อมูลที่ไหลในทิศทางจากผู้ใช้งาน ไปยังเครือข่าย โดยส่วนควบคุมการไหลของข้อมูลนี้จะถูกใช้เพื่อบรรเทาการเกิดความแออัดที่ตัว มัลติเพลกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

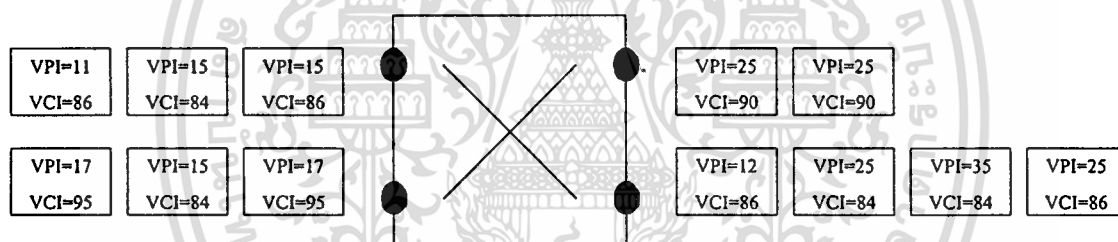


รูปที่ 2.7 การควบคุมความแออัดข้อมูลโดยส่วนควบคุมการไหลของข้อมูล

สำหรับการควบคุมการไหลของข้อมูลนั้น ทำได้โดยการจำกัดความจุของผู้ใช้ กระบวนการของส่วนควบคุมการไหลของข้อมูลนั้น กำหนดได้เป็น 2 กลุ่มของการเชื่อมต่อ คือ การเชื่อมต่อที่ควบคุมไม่ได้ (uncontrolled connection) และการเชื่อมต่อที่ควบคุมได้ (controlled connection) สำหรับการเชื่อมต่อที่ควบคุมไม่ได้ ถ้าไม่มีความแออัดเกิดขึ้นข้อมูลจากผู้ใช้งานต่าง ๆ จะสามารถส่งผ่านเข้าเครือข่ายโดยไม่มีการควบคุมจากส่วนควบคุมการไหลของข้อมูล ทำให้ไม่มีการสะสมของเซลล์ที่รอคอยอยู่ในบัฟเฟอร์ของตัวมัลติเพลกซ์ แต่สำหรับการเชื่อมต่อที่ควบคุมได้ ถ้าเกิดความแออัดข้อมูลขึ้น ข้อมูลที่จะส่งผ่านเครือข่ายนั้น จำเป็นต้องได้รับการควบคุมจากส่วนควบคุมการไหลของข้อมูลก่อน จึงจะสามารถผ่านเข้าเครือข่ายได้ การทำงานของส่วนควบคุมการไหลของข้อมูลนี้ จะไม่ควบคุมข้อมูลที่ไหลจากเครือข่ายไปยังผู้ใช้ แต่จะควบคุมเฉพาะข้อมูลที่ไหลในทิศทางจากผู้ใช้เข้าสู่เครือข่าย และไม่ถูกนำไปใช้ภายในเครือข่ายหรือที่จุดที่เป็นขอบเขตระหว่างเครือข่าย

2.3.2 ส่วนระบุเส้นทางเสมือน (Virtual Path Identifier: VPI) และส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน (Virtual Channel Identifier: VCI)

ในส่วนหัวของเซลล์ ATM จะมีส่วนที่ประกอบด้วยส่วนระบุเส้นทางเสมือน และส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน อยู่จำนวน 24 บิตในเซลล์ UNI หรือ 28 บิตในเซลล์ NNI ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนการจัดเส้นทาง (routing field) โดย ส่วนระบุเส้นทางเสมือน และส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน จะถูกใช้เพื่อระบุเส้นทางเสมือน (virtual path) และวงจรเสมือน (virtual circuit) ที่การเชื่อมต่อต้องการใช้ เพื่อการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โดยจะถูกแสดงในรูปของส่วนระบุการเชื่อมต่อ (connection identifier: CI) ที่ประกอบขึ้นจาก 3 ส่วนคือ ส่วนแสดงการเชื่อมโยงขาเข้า (incoming link identifier) ส่วนระบุเส้นทางเสมือน และส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน สำหรับการเชื่อมต่อของสวิตช์ 2 ตัวด้วยการเชื่อมต่อแบบจุดถึงจุด (point-to-point) อันดับแรก CI จะถูกใช้ เพื่อสร้างตารางการจัดเส้นทาง (routing table) ขึ้นมา ด้วยการกำหนดการแมปปีง (mapping) จากส่วนระบุการเชื่อมต่อขาเข้าไปยังส่วนระบุการเชื่อมต่อขาออก ซึ่งตัวอย่างของสวิตช์ ATM แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การสวิตช์เซลล์ ATM จากการเชื่อมโยงขาเข้าไปยังการเชื่อมโยงขาออก

สำหรับตารางในการจัดเส้นทางของสวิตช์ ATM แสดงได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางการจัดเส้นทางสำหรับสวิตช์ ATM จากรูปที่ 2.8

การเชื่อมต่อ	เซลล์ขาเข้า			เซลล์ขาออก		
	การเชื่อมต่อทางกายภาพ	ส่วนระบุเส้นทางเสมือน	ส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน	การเชื่อมต่อทางกายภาพ	ส่วนระบุเส้นทางเสมือน	ส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน
1	1	15	86	4	25	86
2	1	15	84	4	25	84
3	1	11	86	4	12	86
4	2	17	95	3	25	90
5	2	15	84	4	35	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ชนิดของข้อมูล (Payload Type: PT)

ในส่วนที่แสดงชนิดของข้อมูลนี้มีขนาด 3 บิต โดยบิตที่ 1 ที่อยู่ด้านซ้ายสุดจะเป็นบิตที่มีความสำคัญที่สุด และถูกใช้เพื่อกำหนดชนิดของเซลล์ ถ้าบิตนี้เป็น 0 แสดงว่าเป็นเซลล์ของผู้ใช้งาน (user data cell) แต่ถ้าบิตนี้เป็น 1 แสดงว่าเป็นเซลล์ที่ใช้ในการปฏิบัติการ การจัดการ และการบำรุงรักษาข้อมูล (operation, administration, and maintenance: OAM cell) ส่วนบิตที่ 2 จะใช้เพื่อแสดงว่าเซลล์นี้เคยเกิดความแออัดมาหรือไม่ โดยตารางแสดงชนิดของเซลล์ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงชนิดของเซลล์

ค่า PTI	ความหมาย
000	เซลล์ข้อมูลของผู้ใช้, ไม่เคยเกิดความแออัด, SDU ชนิด 0
001	เซลล์ข้อมูลของผู้ใช้, ไม่เคยเกิดความแออัด, SDU ชนิด 1
010	เซลล์ข้อมูลของผู้ใช้, เคยเกิดความแออัด, SDU ชนิด 0
011	เซลล์ข้อมูลของผู้ใช้, เคยเกิดความแออัด, SDU ชนิด 1
100	เซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของ Segment OAM
101	เซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของ end-to-end OAM
110	เซลล์ในการจัดการทรัพยากร
111	เซลล์สำรอง

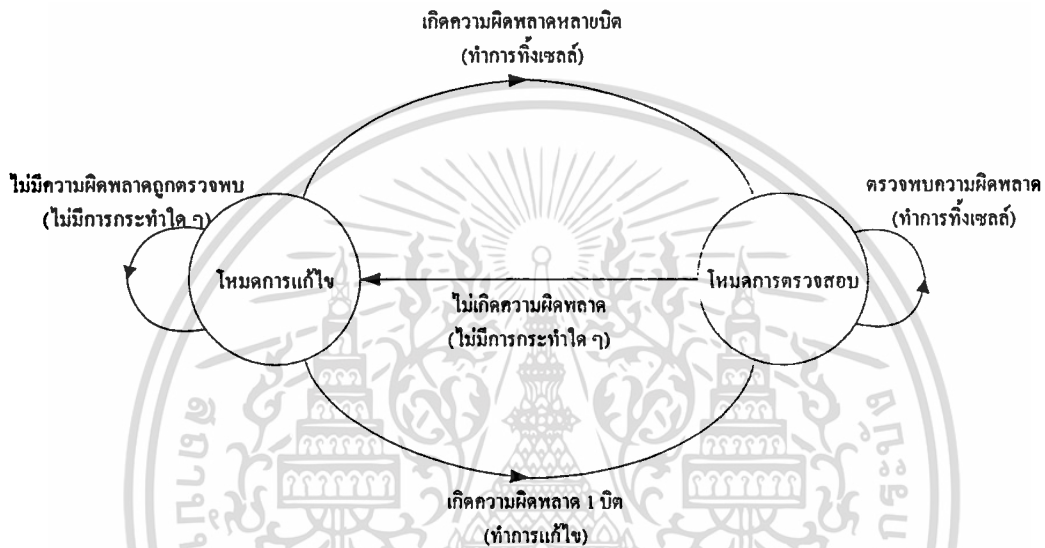
2.3.4 ส่วนแสดงความสำคัญในการสูญเสียเซลล์ (Cell Loss Priority: CLP)

สำหรับส่วนแสดงความสำคัญในการสูญเสียเซลล์นี้มีขนาด 1 บิต ใช้เพื่อแสดงความสำคัญในการสูญเสียเซลล์ เซลล์ที่มีส่วนแสดงความสำคัญในการสูญเสียเซลล์เป็น 1 ถือเป็นเซลล์ที่มีความสำคัญต่ำ และจะถูกทิ้งไปโดยเครือข่ายเมื่อเกิดความแออัดขึ้น แต่ถ้าส่วนแสดงความสำคัญในการสูญเสียเซลล์เป็น 0 จะถือเป็นเซลล์ที่มีความสำคัญสูงกว่า จะถูกทิ้งเป็นลำดับหลัง

2.3.5 ส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัว (Header Error Control: HEC)

ส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวนั้น เป็นส่วนสุดท้ายที่อยู่ในส่วนหัวของเซลล์ ATM ซึ่งมีขนาด 8 บิต มีหน้าที่สำหรับตรวจสอบความผิดพลาด (error detection) และแก้ไขความผิดพลาด (error correction) ที่เกิดกับบิตที่อยู่ในส่วนหัวของเซลล์ อันเป็นสาเหตุให้เกิดการส่งเซลล์ผิดพลาดไปยังปลายทาง เนื่องจากบิตต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณส่วนหัวของเซลล์ ATM ล้วนแต่มีความสำคัญมากสำหรับการส่งเซลล์ให้ไปถึงปลายทางที่ถูกต้อง และเพื่อให้การแก้ไขความผิดพลาดมีประสิทธิภาพ ส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวจึงมีการทำงานที่เรียกว่า การปรับแก้เอกภพผิดพลาดไปหน้า (forward error correction: FEC) ทำแบบที่มีการแก้ไขความผิดพลาดได้บิต ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดี่ยวและตรวจสอบความผิดพลาดได้ 2 บิต (single error correction, double error detection: SECDED) ที่แบ่งการทำงานเป็นสองแบบ คือ การปรับแก้บิตผิดพลาดได้ 1 บิต และการตรวจสอบบิตผิดพลาด 2 บิต สำหรับการทำงานในแบบ การปรับแก้บิตผิดพลาด 1 บิตนั้น ถ้ามีบิตผิดพลาด 1 บิตเกิดขึ้น บิตนั้นจะถูกตรวจพบและปรับแก้ให้ถูกต้องได้ แต่ถ้าความผิดพลาดเกิดมากกว่า 1 บิต เซลล์นั้นจะถูกทิ้งไป และสำหรับการทำงานในแบบการตรวจสอบบิตผิดพลาด ถ้าเกิดบิตผิดพลาดขึ้นแม้แต่บิตเดียว เซลล์นั้นจะถูกทิ้งไปทันที



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมของส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวทางด้านรับ

จากรูปที่ 2.9 แสดงพฤติกรรมของส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวทางด้านรับ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในการทำงานแบบ การปรับแก้บิตผิดพลาด คือ ถ้าไม่มีบิตผิดพลาดถูกตรวจพบ หลังจากการเปรียบเทียบ ส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวที่คำนวณใหม่ทางด้านรับ กับส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวที่ได้รับมา ก็จะไม่มีการกระทำใด ๆ เกิดขึ้น และหลังจากที่ตรวจพบความผิดพลาด 1 บิต แต่ได้ทำการคำนวณส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวใหม่ที่ถูกต้องแล้ว ด้านรับจะส่งต่อไปยังการทำงานแบบการตรวจสอบบิตผิดพลาดต่อไป แต่ถ้ามีบิตผิดพลาดมากกว่า 1 บิตถูกตรวจพบ เซลล์นั้นจะถูกทิ้งไป

การทำงานของส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวมีหัวใจก็คือ การพิจารณาส่วนที่เหลือจากการหาร ส่วนที่บรรจุอยู่ภายในส่วนหัวของเซลล์ ATM โดยที่ไม่รวมส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัว ด้วยเงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล (generator polynomial) ที่เขียนเป็นกลุ่มบิต 100000111 ซึ่งการหารจะเป็นแบบมอดุโล 2 (modulo 2) ที่ไม่ซับซ้อนและทำได้รวดเร็ว โดยการ ใช้กลุ่มของรีจิสเตอร์เลื่อน (shift register) และ ตัวปฏิบัติการ XOR เริ่มต้น ทางด้านส่ง จะต้องมี การเติมบิต 0 จำนวน 8 บิต ต่อท้ายเข้าไปกับบิตใน 4 ไบต์แรก เพื่อให้รวมเป็น 40บิต จากนั้นก็ทำ

การหารด้วยเงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล แล้วนำส่วนที่เหลือจากการหาร มาต่อท้ายใส่แทนที่ในตำแหน่งส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวแล้วจึงทำการส่งออกไป ทางด้านรับจะทำการคำนวณส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวใหม่ เรียกว่า ซินโดรม (syndrome) ด้วยกระบวนการเช่นเดียวกับด้านส่ง โดยการตัดส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัว 8 บิตที่รับได้ออกก่อน และเติมบิต 0 ไปแทน แล้วทำการหารด้วยเงินเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล จากนั้นนำส่วนที่ได้จากการหาร มาเปรียบเทียบกับส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวที่รับได้ สำหรับผลของการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะบอกได้ว่าบิตผิดพลาดเกิดขึ้นที่บิตใดโดยตารางนี้จะถูกใส่ไว้ในโนดต่าง ๆ ของระบบเครือข่าย

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของผลการเปรียบเทียบส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวกับตำแหน่งบิตที่เกิดผิดพลาด

ตำแหน่ง	เลขฐานสอง	เลขฐานแปด	ตำแหน่ง	เลขฐานสอง	เลขฐานแปด
1	0011 0001	31	21	1010 1000	A8
2	1001 1011	9B	22	0101 0111	54
3	1100 1110	CE	23	0010 1010	2A
4	0110 0111	67	24	0001 0101	15
5	1011 0000	B0	25	1000 1001	89
6	0101 1000	58	26	1100 0111	C3
7	0010 1100	2C	27	1110 0000	E0
8	0001 0110	16	28	0111 0000	70
9	00001011	0B	29	0011 1000	38
10	1000 0110	86	30	0001 1100	1C
11	0100 0011	43	31	0000 1110	0E
12	1010 0010	C2	32	0000 0111	07
13	0101 0001	51	33	1000 0000	80
14	1010 1011	CD	34	0100 0000	40
15	1101 0110	D6	35	0010 0000	20
16	0110 1011	6B	36	0001 0000	10
17	1011 0110	B6	37	0000 1000	08
18	0101 1011	5B	38	0000 0100	04
19	1010 1110	AE	39	0000 0010	02

เอกสาร 20 เอกส 0101 0111 สำหรับค่า 57 งานเพื่อการศึกษาเท่า 40 ไม่นอง 0000 0001 ใช้ประโยชน์ 01 ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลองอ้างอิงโพรโทคอล ATM

หลักการของแบบจำลองอ้างอิงโพรโทคอล ก็คือการกำหนดระเบียบการและหน้าที่ของเครือข่ายให้เป็นลำดับชั้น เพื่อความสะดวกในการส่งข้อมูลข้ามผ่านเครือข่าย ซึ่งมีข้อดีอยู่สามประการ คือ ความซับซ้อนของเทคนิคต่าง ๆ จะลดลงเมื่อแบ่งการทำงานออกเป็นลำดับชั้น ปัญหาและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกติดตามแก้ไขด้วยชั้นที่มีหน้าที่เฉพาะ และผู้เรียนรู้ใหม่สามารถทำความเข้าใจต่อวิธีการที่มีอยู่เดิมได้ง่าย แบบจำลองอ้างอิงโพรโทคอล จะกำหนดในรูปแบบของลำดับชั้นต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงลำดับชั้นของโพรโทคอล ATM

	หน้าที่ของชั้นที่สูงกว่า	ชั้นที่สูงกว่า		
	การนำข้อมูลจากชั้นที่สูงกว่ามารวมกัน	ชั้นย่อย CS	ชั้น AAL	
การแบ่งส่วนและจัดเลขลำดับเซลล์	ชั้นย่อย SAR			
การจัดการลำดับชั้น	การควบคุมการไหลของข้อมูล การสร้างและตัดทอนส่วนหัวของเซลล์ การแปลงส่วนระบุเส้นทางเสมือนและส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือนของเซลล์ การมัลติเพลกซ์และดีมัลติเพลกซ์เซลล์	ชั้น ATM		
	การลดการเข้าคู่อัตราของเซลล์ การสร้างและพิสูจน์ลำดับของส่วนตรวจสอบความผิดพลาดในส่วนหัวของเซลล์ การกำหนดขอบเขตของเซลล์ การตัดแปลงเฟรมข้อมูลที่ทำกรส่ง การสร้างและกู้คืนเฟรมข้อมูลที่ทำกรส่ง	ชั้นย่อย TC	ชั้นกายภาพ	
	การเข้าจังหวะบิต การกำหนดสื่อทางกายภาพ	ชั้นย่อย PMD		

จากตารางที่ 2.4 สามารถจำแนกหน้าที่ของลำดับชั้นต่าง ๆ ที่ประกอบรวมเป็นเครือข่าย ATM ได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 ชั้นกายภาพ (Physical Layer)

ชั้นกายภาพมีหน้าที่แปลงสัญญาณบิตให้เป็นเซลล์ และกำหนดชนิดของสื่อตัวกลาง (medium) ที่ควรใช้ ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณและแรงดัน ทางไฟฟ้าหรือแสง นอกจากนี้ ชั้นกายภาพยังมีหน้าที่ในการถ่ายโอนสัญญาณข้อมูลและคอยควบคุมสัญญาณนั้นให้ผ่านสายส่งได้ รวมทั้งการเตรียมสัญญาณนาฬิกาของบิตที่จะส่งไป และทำหน้าที่คอยติดตามสัญญาณของเซลล์ ATM ที่เข้ามาสำหรับชั้นกายภาพของระบบ ATM นี้ จะมีหน้าที่คล้ายกับชั้นกายภาพ (ชั้นที่ 1) ของโพรโตคอล OSI (open systems interconnection) ชั้นกายภาพแบ่งได้เป็น 2 ชั้นย่อย คือ

2.4.1.1 ชั้นย่อย TC (Transmission Convergence) มีหน้าที่ต่าง ๆ 5 ประการ คือ

- 1) การสร้างและกู้คืนเฟรมข้อมูลที่ทำกรส่ง (Transmission frame generation/recovery) ทำหน้าที่สร้างเฟรมข้อมูลที่ด้านส่ง และกู้คืนเฟรมข้อมูลที่ด้านรับ โดยที่การสร้างเฟรมก็คือการแทนที่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเฟรม (frame related information) และเซลล์ ATM ลงในโครงสร้างที่เป็นเฟรม สำหรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเฟรมจะถูกใช้เกี่ยวกับการทำงานของชั้นกายภาพ การทดสอบและการบำรุงรักษาสายส่ง
- 2) การดัดแปลงเฟรมข้อมูลที่ทำกรส่ง (Transmission frame adaptation) ทำหน้าที่ในการดัดแปลงการไหลของเซลล์ ให้เป็นไปตามโครงสร้างข้อมูลของระบบการส่งในทิศทางด้านส่ง ส่วนในทิศทางตรงกันข้ามก็จะทำหน้าที่สกัดกั้นการไหลของเซลล์จากเฟรมการส่ง (transmission frame)
- 3) การกำหนดขอบเขตของเซลล์ (Cell delineation) ทำหน้าที่ในการกำหนดขอบเขตของเซลล์ จากบิตสตรีมที่ได้รับ (จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเซลล์)
- 4) การสร้างและพิสูจน์ลำดับของส่วนตรวจสอบความผิดพลาดในส่วนหัวของเซลล์ (HEC sequence generation/verification) ทำหน้าที่สร้างลำดับส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวทางด้านส่ง แล้วแทรกอยู่ในส่วนหัวของเซลล์ ก่อนที่จะส่งผ่านสื่อออกไป ทางด้านรับจะทำการคำนวณส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวจากที่ได้รับมา และทำการตรวจสอบ แก้ไขความผิดพลาดจากลำดับส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของส่วนหัวที่ส่งมา
- 5) การลดการเข้าคู่อัตราของเซลล์ (Cell rate decoupling) ทำหน้าที่รักษาจังหวะของการรับ-ส่งขบวนบิตที่การเชื่อมต่อ (link) โดยจะมีการแทรกเซลล์ว่าง (idle cell) เข้าไปที่ส่วนช่องว่างของเซลล์ผู้ใช้งาน

2.4.1.2 ชั้นย่อย PMD (Physical Medium-Dependent) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างสุด มีหน้าที่หลัก 2 ประการ คือ

- 1) การกำหนดสื่อทางกายภาพ (Physical medium) ทำหน้าที่กำหนดสื่อทางกายภาพที่จะใช้เป็นสื่อกลาง และจัดส่งขบวนบิตให้ข้ามผ่านเครือข่ายไปได้
- 2) การเข้าจังหวะบิต (Bit timing) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงขบวนข้อมูลให้เข้ากับจังหวะรับและส่ง โดยทำการสร้างและรับรูปคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสื่อกลาง ทำการแทรกและตัดทอนข้อมูลในการเข้าจังหวะบิต รวมทั้งการเข้ารหัสสายส่ง

2.4.2 ชั้น ATM (ATM Layer)

ชั้น ATM เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นกายภาพขึ้นมา และมีคุณสมบัติเป็นอิสระจากชั้นกายภาพ โดยมีหน้าที่คล้ายกับชั้น data link (ชั้นที่ 2) ของโพรโทคอล OSI แบ่งหน้าที่เป็น 4 ประการ คือ

- 1) การมัลติเพลกซ์และดีมัลติเพลกซ์เซลล์ (Cell multiplex and demultiplex) ทำหน้าที่มัลติเพลกซ์เซลล์ที่มาจากส่วนระบุเส้นทางเสมือนและส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือนให้มารวมอยู่ในขบวนเซลล์ทางด้านส่ง สำหรับด้านรับจะทำหน้าที่ดีมัลติเพลกซ์ขบวนเซลล์ ให้ไหลไปในทิศทางที่เหมาะสม และสอดคล้องกับส่วนระบุเส้นทางเสมือนและส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือนได้
- 2) การแปลงส่วนระบุเส้นทางเสมือนและส่วนระบุช่องสัญญาณเสมือน (VPI and VCI translation) เกิดขึ้นที่โนดสวิตช์ ATM หรืออุปกรณ์ต่อไย โดยที่ค่าของส่วนระบุเส้นทางเสมือนของแต่ละเซลล์ จะถูกแปลงไปเป็นค่าส่วนระบุเส้นทางเสมือนใหม่สำหรับเซลล์ขาออกต่อไป
- 3) การสร้างและตัดทอนส่วนหัวของเซลล์ (Cell header generation/extraction) ในทิศทางด้านส่งนั้น หลังจากที่มีการรับข้อมูล เซลล์จากชั้น AAL จะมีการสร้างส่วนหัวของเซลล์ที่เหมาะสม ส่วนทางด้านรับก็จะมีการย้ายส่วนหัวของเซลล์โดยจะมีเฉพาะส่วนข้อมูลของเซลล์ที่จะส่งต่อไปยังชั้น AAL
- 4) การควบคุมการไหลของข้อมูล (Generic flow control) จะถูกใช้เฉพาะที่การเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่าย (UNI) โดยทำหน้าที่ควบคุมการไหลทราฟฟิกที่เข้าสู่เครือข่าย

2.4.3 ชั้น AAL (ATM Adaptation Layer)

ในชั้น AAL นี้ จะมีการทำงานร่วมกับชั้น ATM โดยการทำงานมีลักษณะคล้ายกับชั้น data link ของโพรโตคอล OSI ชั้น AAL แบ่งได้เป็น 2 ชั้นย่อย คือ

2.4.3.1 ชั้นย่อย CS (Convergence Sublayer) ทำหน้าที่รับข้อมูลของผู้ใช้จากชั้นที่อยู่สูงกว่า และทำให้อยู่ในรูปของเซลล์ ATM

2.4.3.2 ชั้นย่อย SAR (Segmentation And Reassembly) ทำหน้าที่จัดหาเลขลำดับของเซลล์ที่ส่งมาจากชั้น CS เพื่อส่งต่อไปยังชั้น ATM

ชั้น AAL จะถูกแบ่งออกเป็นชนิดการบริการต่าง ๆ ตามพารามิเตอร์ต่อไปนี้ คือ ความสัมพันธ์ของการเข้าจังหวะ (timing relation) อัตราบิต (bit rate) และโหมดการเชื่อมต่อ (connection mode) ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดของการบริการสำหรับชั้น AAL

ลักษณะเฉพาะของการส่ง	ประเภทของ AAL			
	ประเภท A	ประเภท B	ประเภท C	ประเภท D
ชนิดของ AAL	AAL 1	AAL 2	AAL 3/4 AAL 5	AAL 3/4 AAL 5
การเข้าจังหวะระหว่างแหล่งกำเนิดและปลายทาง	ต้องการ	ต้องการ	ไม่ต้องการ	ไม่ต้องการ
อัตราของบิต	คงที่	ไม่คงที่	ไม่คงที่	ไม่คงที่
โหมดการเชื่อมต่อ	Connection-oriented	Connection-oriented	Connection-oriented	Connectionless
ตัวอย่างการบริการสื่อสารในแต่ละประเภท	Circuit-switch หรือ leaseline	Packet audio หรือ video	Frame relay หรือ X.25	Internet หรือ SMDS

AAL 1

AAL 1 จะถูกใช้สำหรับบริการแบบที่มีอัตราบิตคงที่ (constant bit rate: CBR) ที่ต้องการการเข้าจังหวะระหว่างจุดของการเชื่อมต่อ (แหล่งกำเนิดปลายทาง) ตัวอย่างเช่น CBR audio, CBR video และ CBR voice รวมทั้งการให้บริการแบบสวิตช์วงจร (circuit-switch) และการเชื่อมต่อสายเช่า (lease line) เนื่องจากว่าบริการแบบที่มีอัตราบิตคงที่นั้น จะทำการส่งและรับข้อมูลจากชั้นที่อยู่ด้านบน ด้วยอัตราบิตที่คงที่ โดยมีการรับ-ส่งข้อมูลเข้าจังหวะ (timing information) ระหว่างแหล่งกำเนิดและปลายทาง รวมทั้งข้อมูลที่แสดงว่าเกิดการสูญหายหรือความผิดพลาด ก็จะถูกส่งไปยังชั้นบน เมื่อความผิดพลาดนั้นไม่สามารถแก้ไขได้โดยชั้น AAL

AAL 2

AAL 2 ใช้สำหรับบริการแบบที่มีอัตราบิตไม่คงที่ (variable bit rate: VBR) ที่ต้องการการเข้าจังหวะ ระหว่างจุดการเชื่อมต่อ (end-to-end) สำหรับตัวอย่างของการบริการได้แก่ VBR video, VBR audio และ VBR voice รวมทั้งสัญญาณียุทกลุ่มข้อมูล (packet radio) และวิดีโอกลุ่มข้อมูล (packet video) การบริการแบบที่มีอัตราบิตไม่คงที่นี้ จะทำการส่งและรับข้อมูลจากแหล่งกำเนิด ด้วยอัตราบิตที่ไม่คงที่ และมีการรับ-ส่งข้อมูลเข้าจังหวะระหว่างแหล่งกำเนิดและปลายทาง รวมทั้งข้อมูลที่แสดงการเกิดความสูญหายหรือความผิดพลาด

AAL 3/4

AAL 3/4 นิยามสำหรับบริการแบบที่มีอัตราบิตไม่คงที่ ที่สนับสนุนการส่งผ่านข้อมูลทั้งแบบ connection-oriented และแบบ connectionless แต่ไม่ต้องการการเข้าจังหวะระหว่างแหล่งกำเนิดและปลายทาง ตัวอย่างของบริการได้แก่ Frame relay และ X.25 โหมดการบริการสำหรับ AAL 3/4 มี 2 ลักษณะ คือการบริการ โหมดข้อความ (message mode) ใช้สำหรับการถ่ายโอนข้อมูลที่มีลักษณะเป็นเฟรม เช่น เฟรม HDLC (high level data link control) และการบริการ โหมดสตรีมมิง (streaming mode) ซึ่งเหมาะกับการถ่ายโอนข้อมูลความเร็วต่ำ ที่ต้องการการหน่วงเวลาดำ

AAL 5

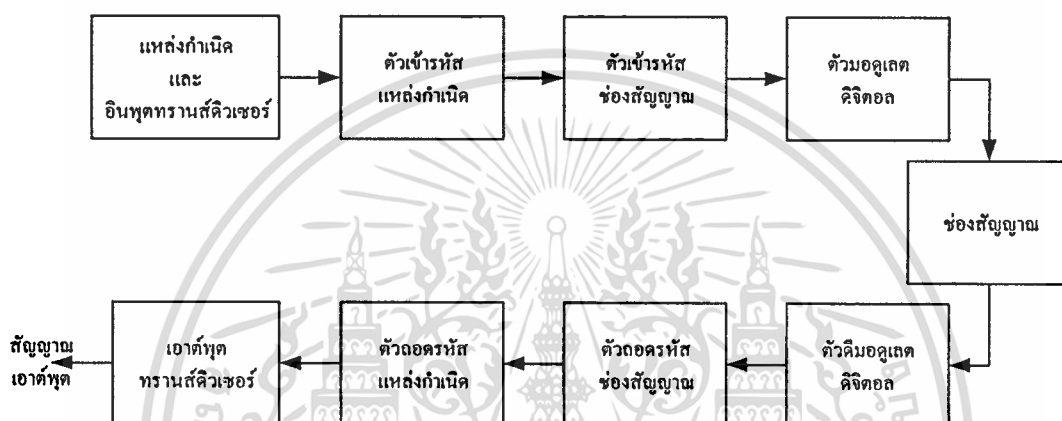
AAL 5 มีลักษณะคล้ายกับชั้น AAL 3/4 และเหมาะสำหรับบริการแบบที่มีอัตราบิตไม่คงที่ ที่สนับสนุนการส่งผ่านข้อมูลทั้งแบบ connection-oriented และแบบ connectionless แต่ไม่ต้องการการเข้าจังหวะระหว่างแหล่งกำเนิดและปลายทาง ตัวอย่างบริการได้แก่ อินเทอร์เน็ต (Internet) และ SMDS (switched multi-megabit data service)

บทที่ 3

การสื่อสารระบบดิจิทัลผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้ง

3.1 บทนำ

การสื่อสารระบบดิจิทัลเป็นการส่งข้อมูลที่มีรูปแบบเป็นดิจิทัล จากแหล่งกำเนิดไปยังปลายทาง โดยที่ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารระบบดิจิทัล แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของการสื่อสารระบบดิจิทัล

ในระบบการสื่อสารดิจิทัล เอาต์พุตของแหล่งกำเนิดอาจจะเป็นสัญญาณแอนะล็อก หรือสัญญาณดิจิทัลก็ได้ ถ้าข้อมูลเป็นสัญญาณแอนะล็อกก็จะถูกแปลงให้กลับไปอยู่ในรูปลำดับดิจิทัลไบนารี การแปลงเอาต์พุตของแหล่งกำเนิด ทั้งสัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล ให้อยู่ในรูปของลำดับดิจิทัลไบนารี นี้เรียกว่า การเข้ารหัสแหล่งกำเนิด และเรียกลำดับดิจิทัลไบนารีว่า ลำดับข้อมูล จากนั้นจึงส่งลำดับข้อมูลที่ได้ไปยังตัวเข้ารหัสช่องสัญญาณ โดยที่ตัวเข้ารหัสช่องสัญญาณ มีหน้าที่เพื่อเพิ่มส่วนบิตเพิ่มเติมในลำดับข้อมูลไบนารี เพื่อประโยชน์ให้ด้านรับนำไปใช้ลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนและการแทรกสอด อันเนื่องมาจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ ตัวอย่างการเข้ารหัสเช่น การเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้นและการเข้ารหัสการประสาน จากนั้นลำดับข้อมูลไบนารีจากตัวเข้ารหัสช่องสัญญาณจะถูกส่งมาที่ตัวมอดูเลตแบบดิจิทัล โดยหน้าที่ของตัวมอดูเลต คือการทำให้ลำดับข้อมูลไบนารีอยู่ในรูปแบบของรูปคลื่นสัญญาณ สำหรับช่องสัญญาณในการสื่อสารคือ สื่อทางกายภาพที่ใช้ส่งสัญญาณจากด้านส่งไปยังด้านรับนั่นเอง โดยในการสื่อสารไร้สาย ช่องสัญญาณอาจจะเป็นชั้นบรรยากาศ เมื่อสัญญาณผ่านช่องสัญญาณมาถึงด้านรับ ตัวดีมอดูเลตแบบดิจิทัลจะทำให้คลื่นสัญญาณที่ส่งมากลับไปอยู่ในรูปลำดับข้อมูลไบนารี จากนั้นจึงส่งต่อไปยังตัวถอดรหัสช่องสัญญาณ และตัวถอดรหัสแหล่งกำเนิด เพื่อจะสร้างลำดับข้อมูลเดิมกลับคืนมา

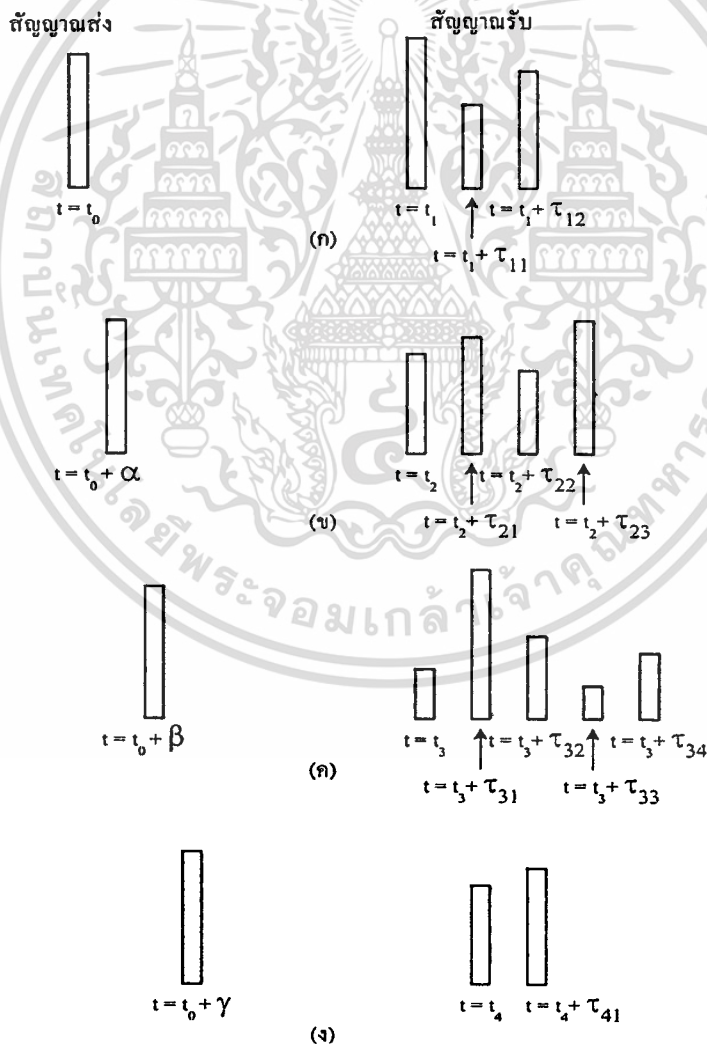
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหัวข้อ 3.2 กล่าวถึงลักษณะของช่องสัญญาณในการสื่อสารที่มีการเฟดดิ้งหลายวิถี (multipath fading channel) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของตัวกลาง ส่วนหัวข้อ 3.3 กล่าวถึงแบบจำลองของช่องสัญญาณ หัวข้อ 3.4 กล่าวถึงเทคนิคโคเวอเรจซีดีในช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้ง และหัวข้อ 3.5 กล่าวถึงระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสที่ใช้กับการสื่อสาร ATM ไร้สาย

3.2 คุณลักษณะของช่องสัญญาณเฟดดิ้งหลายวิถี

เมื่อทำการส่งสัญญาณพัลส์เล็ก ๆ ไปบนช่องสัญญาณแบบหลายวิถีที่มีการแปรผันตามเวลา (time-varying multipath channel) สัญญาณที่รับได้จะเป็นขบวนพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นว่าคุณลักษณะอย่างหนึ่งของตัวกลางแบบหลายวิถีก็คือ การแผ่กว้างทางเวลา (time spread) ของสัญญาณที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการตอบสนองทางเวลาของช่องสัญญาณหลายวิถี เมื่อส่งพัลส์สัญญาณช่วงแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และคุณลักษณะอีกประการหนึ่งอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเวลาในโครงสร้างของตัวกลาง นั่นคือ ถ้าเราทำการส่งพัลส์ไปเรื่อย ๆ เราจะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของขบวนพัลส์ที่ได้รับ ซึ่งมีทั้งการเปลี่ยนแปลงในขนาดของพัลส์ การประวิงเวลาระหว่างพัลส์ และการเปลี่ยนแปลงจำนวนของพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และการแปรผันของเวลาจะไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้

ต่อไปเราจะพิจารณาถึงผลกระทบของช่องสัญญาณ ต่อสัญญาณที่ถูกส่งไป ซึ่งสัญญาณที่ถูกส่งออก แสดงได้ในสมการที่ (3.1)

$$s(t) = \text{Re}[s_l(t)e^{j2\pi f_c t}] \quad (3.1)$$

โดยที่ $s(t)$ คือ สัญญาณที่ทำการส่งออก

$s_l(t)$ คือ สัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูล (equivalent lowpass signal)

f_c คือ ความถี่ของคลื่นพาห้

กำหนดให้มีเส้นทางในการแพร่กระจายหลายเส้นทาง แต่ละเส้นทางสอดคล้องกับเวลาประวิงการแพร่กระจาย (propagation delay) และตัวประกอบการลดทอน (attenuation factor) โดยทั้งสองตัวประกอบนี้จะมีการแปรผันตามเวลา ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวกลาง ซึ่งสัญญาณผ่านแถบ (band-pass signal) ที่รับได้ แสดงได้ดังสมการที่ (3.2)

$$x(t) = \sum_n \alpha_n(t) s[t - \tau_n(t)] \quad (3.2)$$

โดยที่ $\alpha_n(t)$ คือ ตัวประกอบการลดทอนบนเส้นทางที่ n

$\tau_n(t)$ คือ เวลาประวิงการแพร่กระจายในเส้นทางที่ n

เมื่อแทนค่า $s(t)$ จากสมการที่ (3.1) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$x(t) = \text{Re}(\{\sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} s_l[t - \tau_n(t)]\} e^{j2\pi f_c t}) \quad (3.3)$$

และจากสมการที่ (3.3) จะแสดงได้ว่าสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูลทางด้านรับ (equivalent lowpass received signal) แสดงได้ดังสมการที่ (3.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_l(t) = \sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} s_l[t - \tau_n(t)] \quad (3.4)$$

โดยที่ $r_l(t)$ คือ ผลตอบสนองของช่องสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูล ต่อสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูล

ดังนั้น ช่องสัญญาณแบบผ่านต่ำสมมูล (equivalent lowpass channel) แสดงได้ในรูปของผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่มีการแปรผันตามเวลาดังแสดงในสมการที่ (3.5)

$$c(\tau; t) = \sum_n \alpha_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta[\tau - \tau_n(t)] \quad (3.5)$$

ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (correlation function) และฟังก์ชันความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (power spectral density) สามารถใช้เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของช่องสัญญาณเฟดดิ้งหลายวิถีได้ เมื่อพิจารณาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์แบบผ่านต่ำสมมูล $c(\tau; t)$ ซึ่งเป็นกระบวนการสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ (complex-valued Gaussian random process) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และสมมติให้ $c(\tau; t)$ มีลักษณะคงที่แบบกว้าง (wide-sense stationary) ดังนั้น ฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ (autocorrelation function) ของ $c(\tau; t)$ แสดงได้ดังสมการที่ (3.6)

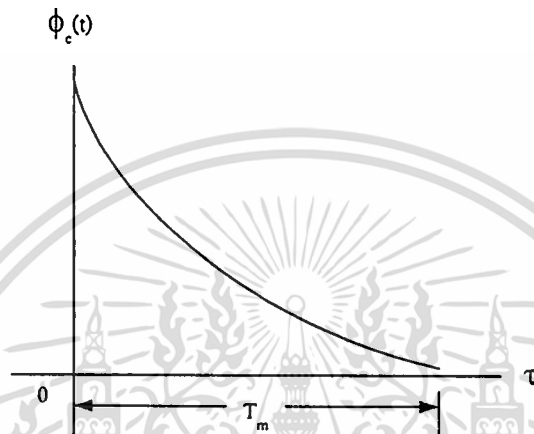
$$\phi_c(\tau_1, \tau_2; \Delta t) = \frac{1}{2} E[c^*(\tau_1; t) c(\tau_2; t + \Delta t)] \quad (3.6)$$

สำหรับตัวกลางในการรับส่งสัญญาณวิทยุส่วนมากนั้น การลดทอน (attenuation) และการเลื่อนเฟส (phase shift) ของช่องสัญญาณที่สัมพันธ์กับการประวิง τ_1 นั้น จะไม่สัมพันธ์กับการลดทอนและการเลื่อนเฟสที่สัมพันธ์กับการประวิง τ_2 ซึ่งเรียกกรณีนี้ว่า การกระจัดกระจายแบบไม่สหสัมพันธ์ (uncorrelated scattering) ดังนั้นสมการที่ (3.6) สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (3.7)

$$\frac{1}{2} E[c^*(\tau_1; t) c(\tau_2; t + \Delta t)] = \phi_c(\tau_1; \Delta t) \delta(\tau_1 - \tau_2) \quad (3.7)$$

พิจารณาที่ $\Delta t = 0$ ผลของฟังก์ชันอัตโนมัติสหสัมพันธ์ $\phi_c(\tau_1; \Delta t) = \phi_c(\tau)$ ซึ่งก็คือกำลังงานเอาต์พุตเฉลี่ยของช่องสัญญาณ ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาประวิง τ $\phi_c(\tau)$ จึงถูกเรียกว่า รูปร่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มของสัญญาณหลายวิถี (multipath intensity profile: MIP) ของช่องสัญญาณ โดยทั่วไปแล้ว $\phi_c(\tau; \Delta t)$ จะแสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลาประวิง τ และความแตกต่างของเวลาในการสังเกต Δt ปกติฟังก์ชัน $\phi_c(\tau)$ จะมีขนาดที่ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเวลาประวิงมีค่าเพิ่มขึ้น ช่วงค่าเวลาประวิง τ ที่ทำให้ $\phi_c(\tau)$ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เรียกว่า การแผ่อกหลายวิถี (multipath spread) ของช่องสัญญาณ ซึ่งแทนด้วยสัญญาณ T_m ดังแสดงในรูปที่ 3.3

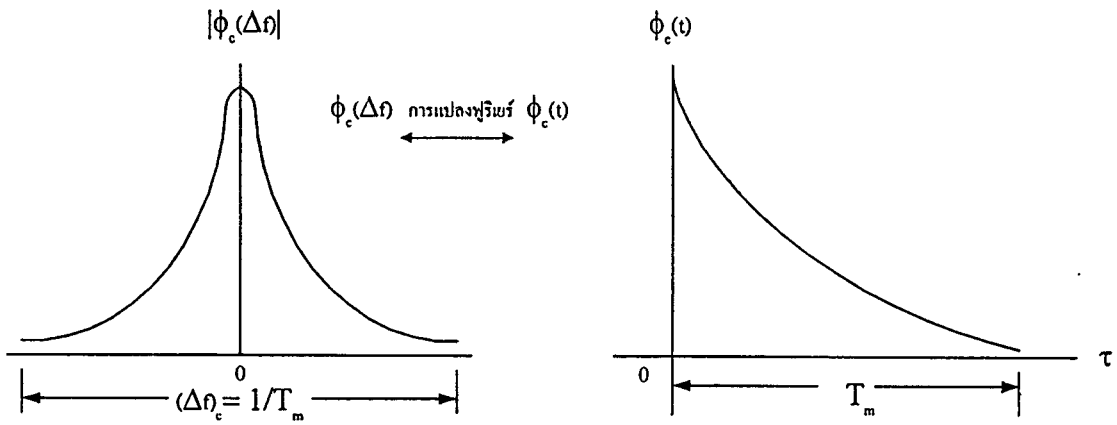


รูปที่ 3.3 คุณลักษณะของรูปร่างความเข้มของสัญญาณหลายวิถี

ในทำนองเดียวกัน การแสดงคุณลักษณะของช่องสัญญาณแบบหลายวิถีที่แปรผันตามเวลา ในโดเมนความถี่ ก็สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.4 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ $\phi_c(\Delta f)$ ในตัวแปรความถี่กับ $\phi_c(\tau)$ จากผลของความสัมพันธ์ในการแปลงฟูรีเยร์ระหว่าง $\phi_c(\Delta f)$ และ $\phi_c(\tau)$ จะได้ว่า การแผ่อกหลายวิถี (multipath spread) (T_m) เป็นการวัดแบนด์วิดท์ร่วมนัย (coherent bandwidth) ของช่องสัญญาณ ดังแสดงในสมการที่ (3.8)

$$(\Delta f)_c \approx \frac{1}{T_m} \quad (3.8)$$

ถ้า $(\Delta f)_c$ มีค่าน้อยกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป จะเรียกช่องสัญญาณนี้ว่า ช่องสัญญาณแบบเจาะจงความถี่ (frequency selective channel) แต่ถ้า $(\Delta f)_c$ มีค่ามากกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกส่งออกไป จะเรียกว่า ช่องสัญญาณแบบไม่เจาะจงความถี่ (frequency non selective channel)



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน $\phi_c(\Delta f)$ และฟังก์ชัน $\phi_c(\tau)$

3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณสามารถแทนได้ด้วย แบบจำลองช่องสัญญาณต่าง ๆ ซึ่งจะมีค่าของผลตอบ (สนองต่ออิมพัลส์) ของวงจรกรองความถี่ต่ำ ในกรณีทั่วไป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.9)

$$c(\tau; t) = \sum_{l=0}^{L-1} \beta_n(t) e^{-j\gamma_n} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (3.9)$$

โดยที่ β_n คือ อัตราการลดทอนด้านแอมพลิจูดของสัญญาณ (amplitude distortion factor) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของความน่าจะเป็น แสดงด้วยการแจกแจงแบบต่าง ๆ

τ_n คือ เวลาประวิง (time delay) ในเส้นทางต่าง ๆ เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) บนช่วง $[0, T]$

γ_n คือ การประวิงเฟส (phase delay) ที่เป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ บนช่วง $[0, 2\pi]$

L คือ จำนวนเส้นทาง ที่สอดคล้องกับผลของเฟดดิ้งหลายวิถี (multipath fading) ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อน การหักเห และการกระเจิงของสัญญาณภายในช่องสัญญาณ

สำหรับรูปแบบของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density function: PDF) มีหลายลักษณะดังนี้

3.3.1 แบบจำลองแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution)

แบบจำลองแบบเรย์ลี ใช้จำลองการเกิดเฟดดิ้งหลายวิถีที่ไม่รวมเส้นทาง direct line-of-sight (LOS) มักใช้กับการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณวิทยุ ตัวอย่างเช่น การสื่อสารวิทยุแบบรั้งฝั่ง (cellular radio) เหมาะกับสภาพแวดล้อมในชนบท ซึ่งแสดงได้ด้วยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ในสมการที่ (3.10)

$$p_R(r) = \frac{2r}{\Omega} e^{-r^2/\Omega} \quad r \geq 0 \quad (3.10)$$

โดยที่ $\Omega = E(R^2)$

3.3.2 แบบจำลองแบบไรเซียน (Rician distribution)

เป็นแบบจำลองที่มีพารามิเตอร์ 2 ค่า ใช้จำลองเส้นทางในการกระจายสัญญาณที่ประกอบด้วยส่วนหลักคือ ส่วน direct line-of-sight และส่วนประกอบในเส้นทางอื่น ๆ ที่มีความแรงของสัญญาณรองลงมา และถูกใช้กับการสื่อสาร microcellular land-mobile การสื่อสาร picocellular indoor และสภาพแวดล้อมในโรงงาน ซึ่งแสดงได้ด้วยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ในสมการที่ (3.11)

$$p_R(\beta) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2 + s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (3.11)$$

โดยที่ $I_0(x)$ คือฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function)

3.3.3 แบบจำลองแบบนาคากามิ (Nakagami distribution)

เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลอง และสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทั้งในชนบทและในเมือง และเหมาะสำหรับการแพร่กระจายของ land mobile และ indoor mobile ซึ่งแสดงได้ด้วยค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในสมการที่ (3.12)

$$p_R(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-mr^2/\Omega} \quad r \geq 0 \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = \frac{\Omega^2}{E[(R^2 - \Omega)^2]}$$

โดยที่ $\Omega = E(R^2)$

แบบจำลองนาคากามินี้ยังสามารถอธิบายแบบจำลองอื่น ๆ ได้ด้วย ถ้าพารามิเตอร์ m ของสมการแบบจำลองนาคากามินี้มีค่าเป็น $m=1$ แสดงว่าเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลี และถ้า $m=0.5$ แสดงว่าเป็นการแจกแจงแบบเกาส์ข้างเดียว ส่วนถ้า $m \rightarrow \infty$ แสดงว่า เป็นกรณีในอุดมคติที่ไม่มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณ

3.4 เทคนิคไดเวอร์ซิตีในช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้ง

เทคนิคไดเวอร์ซิตีถูกนำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงจากการลดลงของสมรรถนะของระบบ อันเนื่องมาจากเฟดดิ้ง มีจุดประสงค์เพื่อลดความผิดพลาดในการรับสัญญาณ คือลดความถี่ของเฟดดิ้งและลดระยะเวลาเฟดดิ้ง โดยการจับคู่อุปกรณ์ด้านรับให้รับสัญญาณที่จำลองจากสัญญาณส่งหลาย ๆ สัญญาณ ซึ่งส่งผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งอย่างเป็นอิสระต่อกัน ในระบบวิทยุเคลื่อนที่ เทคนิคไดเวอร์ซิตีที่นิยมใช้มีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น ไดเวอร์ซิตีทางเวลา (Time diversity) สัญญาณข้อมูลเดียวกันจากด้านส่ง จะส่งผ่านช่วงเวลาไปในช่วงเวลาต่าง ๆ หลายช่วงเวลา โดยที่ช่วงเวลาระหว่างการส่งจะต้องห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับเวลารวมนัยของช่องสัญญาณ ไดเวอร์ซิตีแบบสายอากาศ (Antenna diversity) บางที่เป็นที่รู้จักในชื่อ การรับหลายแห่ง (space diversity reception) วิธีนี้จะใช้สายอากาศหลาย ๆ อัน เช่น ใช้สายอากาศส่งเพียงอันเดียว แต่ใช้สายอากาศรับหลายอัน โดยที่สายอากาศรับจะต้องมีระยะห่างจากกันที่เพียงพอ โดยทั่วไปมีค่าน้อย 10 เท่าของความยาวคลื่น เพื่อให้ได้สัญญาณที่เกิดเฟดดิ้งอย่างเป็นอิสระต่อกัน ไดเวอร์ซิตีเส้นทาง (Path diversity) จะทำการสร้างเส้นทางที่แตกต่างกันทางด้านส่งเพื่อส่งสัญญาณ โดยเครื่องส่งที่แตกต่างกัน ไดเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency diversity) สัญญาณข้อมูลเดียวกันจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณที่เฟดดิ้งอย่างเป็นอิสระไปบนความถี่คลื่นพาห้หลายความถี่ โดยที่ความถี่ระหว่างช่องสัญญาณจะต้องห่างกันมากกว่าหรือเท่ากับแบนด์วิดท์รวมนัยของช่องสัญญาณ

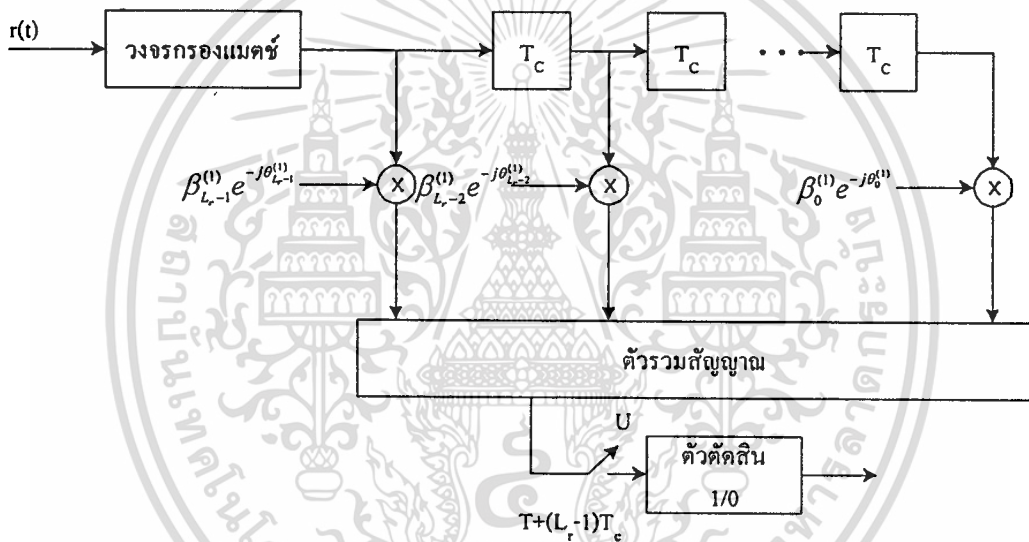
สำหรับเทคนิคไดเวอร์ซิตีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ คือ ไดเวอร์ซิตีหลายวิถี (Multipath diversity) ซึ่งใช้ในช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเงาเงาความถี่ โดยที่สัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณส่งจำนวนหลายสัญญาณ แต่ละสัญญาณจะมีเวลาประวิงและขนาดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับรูปร่างการประวิงกำลังงาน (power delay profile) ของช่องสัญญาณในขณะนั้น โดยหลักการคือใช้สัญญาณที่มีแบนด์วิดท์มากกว่าแบนด์วิดท์รวมนัย (Δf_c) ของช่องสัญญาณมาก ๆ จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องรับสามารถรับสัญญาณซึ่งมีเส้นทางของเฟดดิ้งหลายเส้นทาง โดยที่เฟดดิ้งเป็นอิสระต่อกัน และมีเวลาที่สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณในแต่ละเส้นทางได้เป็น $1/W$ ดังนั้นถ้า multipath spread มีค่าเป็น T_m จะทำให้มีองค์ประกอบของสัญญาณต่าง ๆ แยกออกเป็น $T_m W$ องค์ประกอบ แต่เนื่องจาก $T_m \approx 1/(\Delta f_c)$ ดังนั้นจำนวนองค์ประกอบของสัญญาณต่าง ๆ ซึ่งแยกออกแสดงได้เป็น $W/(\Delta f_c)$ ด้วยหลักการดังกล่าวทำให้จำนวนเส้นทางของสัญญาณแสดงได้เป็น $L \approx W/(\Delta f_c)$ เครื่องรับที่มีความสามารถดังกล่าว จะเรียกว่า เครื่องรับแบบเรค (Rake receiver)

ในรูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของเครื่องรับแบบ Rake ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรกรองเมตซ์ (match filter) สายการประวิงเวลา (tapped delay line) ตัวรวมสัญญาณ วงจรซั๊กตัวอย่าง (sampling circuit) และวงจรตัดสินใจ (decision circuit)



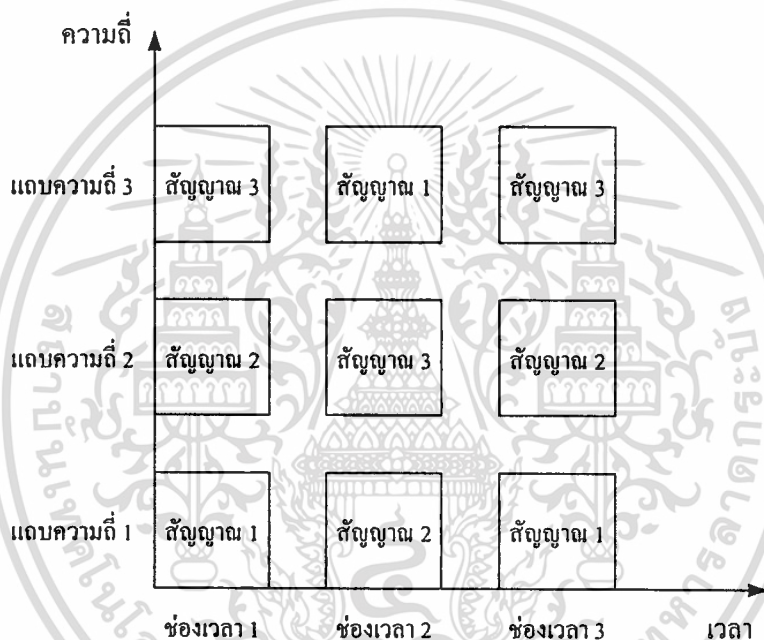
รูปที่ 3.5 เครื่องรับแบบ Rake

3.5 ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสที่ใช้กับการสื่อสาร ATM ไร้สาย

ในระบบการสื่อสาร ATM ไร้สายนั้น ปัญหาอย่างหนึ่งที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ เมื่อมีผู้ใช้งานมากกว่า 1 คนพยายามที่จะเข้าใช้แบนด์วิธช่องสัญญาณในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการแก้ไข โดยการจัดแบ่งทรัพยากรในที่นี้คือ แบนด์วิธช่องสัญญาณ ให้กับผู้ใช้งานแต่ละคนอย่างเหมาะสม โพรโตคอลระบบการเข้าถึงหลายทางจึงเกิดขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการแย่งชิงช่องสัญญาณ เพราะช่องสัญญาณในการสื่อสารมีจำนวนจำกัด เมื่อเทียบกับจำนวนผู้ใช้งาน อีกทั้งยังมีราคาแพง

สำหรับระบบการเข้าถึงหลายทางแบ่งออกได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA) และการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) แต่วิธีเหล่านี้ก็ยังมีข้อเสียคือ ถ้าผู้ใช้งานไม่มีการส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติเห็นไปเซบระยะขึ้นดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล ความถี่หรือช่องเวลานั้นก็จะไม่ถูกใช้งาน ดังนั้นวิธีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access: CDMA) จึงเกิดขึ้นเพื่อลดปัญหาการใช้ช่องสัญญาณไม่คุ้มค่า เพราะการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส จะทำการแบ่งช่องสัญญาณด้วยการกำหนดรหัสให้ผู้ใช้งานแต่ละคน ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ตลอดย่านความถี่ รหัสเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อแปลงสัญญาณของผู้ใช้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างกว่า ที่เรียกว่า การมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ (spread spectrum) โดยที่แบนด์วิดท์ของสัญญาณรหัส จะมีความกว้างกว่าสัญญาณข้อมูล ดังนั้นการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส จึงเรียกอีกอย่างว่า การเข้าถึงหลายทางแบบสเปกตรัมแผ่ (Spread Spectrum Multiple Access: SSMA) รูปแบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส แสดงในรูปที่ 3.6

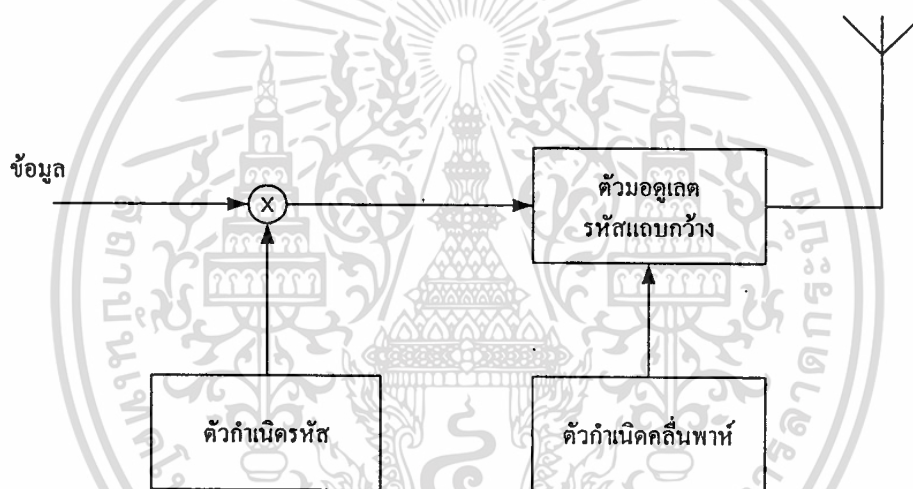


รูปที่ 3.6 รูปแบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส

การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส สามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะ เช่นวิธีการจัดลำดับโดยตรง (Direct Sequence) ที่ใช้การคูณสัญญาณข้อมูลโดยตรงกับสัญญาณรหัส วิธีการกระโดดความถี่ (Frequency Hopping) ที่ความถี่ของคลื่นพาห่ที่มอดูเลตกับสัญญาณข้อมูลจะมีค่าไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนไปตามคาบเวลา ในระหว่างช่วงเวลา T ความถี่คลื่นพาห่จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าเปลี่ยนช่วงเวลาไป คลื่นพาห่จะกระโดดไปยังความถี่อื่นหรือความถี่เดิมก็ได้ สำหรับรูปแบบของการกระโดดความถี่นั้นจะถูกตัดสินใจโดยรหัส วิธีการกระโดดเวลา (Time Hopping) ซึ่งสัญญาณข้อมูลจะถูกส่งตามช่วงเวลาที่ถูกแบ่งออก และกำหนดโดยสัญญาณรหัส แคนเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นเฟรม และแต่ละเฟรมจะแบ่งออกเป็น M ช่องเวลา ในแต่ละเฟรมผู้ใช้จะสามารถส่งข้อมูลได้เพียง 1 ใน M ช่องเวลา และวิธีแบบผสม (Hybrid system) ที่ใช้การรวมกันของเทคนิคตั้งแต่สองอย่างขึ้นไป โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

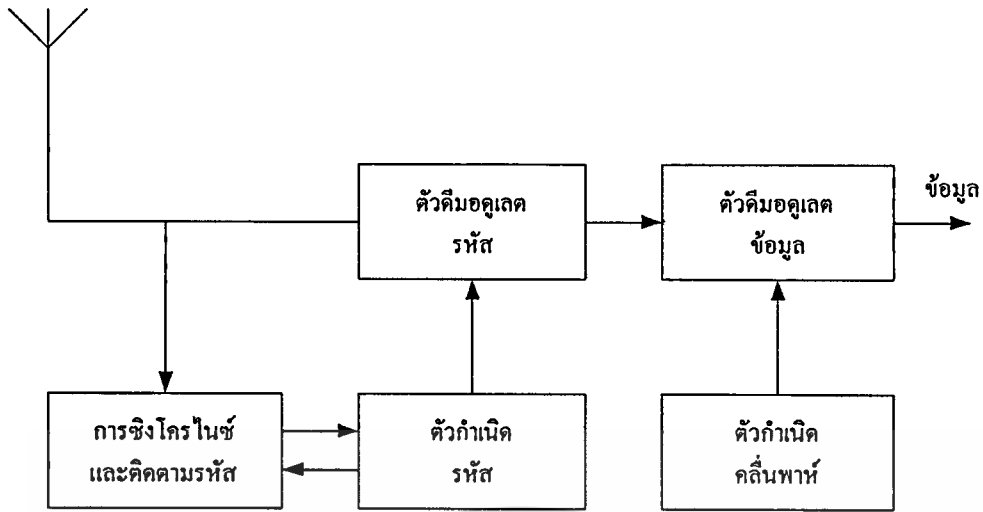
มีหลายลักษณะ คือ DS/FH, DS/TH, FH/TH และ DS/FH/TH แนวคิดของวิธีนี้ คือการเอาข้อดีของแต่ละเทคนิคมารวมกัน

สำหรับการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ วิธีการจัดลำดับโดยตรง ที่สัญญาณข้อมูลจะถูกมอดูเลตโดยตรงกับสัญญาณรหัสดิจิทัล โดยที่สัญญาณข้อมูลเป็นได้ทั้งสัญญาณแอนะล็อกและสัญญาณดิจิทัล แต่โดยส่วนมากจะเป็นสัญญาณดิจิทัล เมื่อสัญญาณข้อมูลคูณกับสัญญาณรหัสแล้ว สัญญาณที่ได้รับจะไปมอดูเลตกับคลื่นพาห์แถบความถี่กว้าง ในรูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการจัดลำดับโดยตรงด้านส่ง โดยสัญญาณข้อมูลฐานสองจะถูกมอดูเลตกับลำดับรหัส โดยที่ลำดับรหัสประกอบด้วย บิตรหัส +1 หรือ -1 หรือเรียกว่า ชิพ ซึ่งอัตราชิพของรหัสสัญญาณจะต้องมีขนาดมากกว่าอัตราชิพของสัญญาณข้อมูล สำหรับการมอดูเลตรหัสนั้น มีหลายรูปแบบแบ่งตามเทคนิคของการมอดูเลต เช่นการมอดูเลตแบบ BPSK, DPSK, QPSK หรือ MSK



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของการจัดลำดับโดยตรงด้านส่ง

สำหรับที่ด้านรับ จะใช้การดีมอดูเลตแบบร่วมนัย (Coherent demodulator) เพื่อดีสเปรดสัญญาณที่รับได้ ซึ่งทางด้านรับนอกจากต้องรู้ลำดับรหัสที่ใช้ในการแผ่สัญญาณแล้ว ยังต้องทำการซิงโครไนซ์ลำดับรหัสจากสัญญาณที่รับได้กับลำดับรหัสที่สร้างขึ้นด้วย โดยการซิงโครไนซ์นั้นจะต้องเริ่มต้นตั้งแต่ ด้านรับเริ่มรับข้อมูลและรักษาการซิงโครไนซ์ไปจนกว่าจะรับข้อมูลเสร็จ หลังจากการดีมอดูเลตก็จะได้รับข้อมูลเดิมกลับมา โดยบล็อกไดอะแกรมของการจัดลำดับโดยตรงทางด้านรับ แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมของการจัดลำดับโดยตรงด้านรับ

ข้อดีของวิธีการจัดลำดับโดยตรง

1. การสร้างสัญญาณรหัส ทำได้ง่าย โดยใช้การคูณธรรมดา
2. เนื่องจากวิธีนี้ต้องการความถี่คลื่นพาห์เพียงความถี่เดียว ดังนั้นการสร้างความถี่จึงไม่ยุ่งยากซับซ้อน
3. การคิมอคูเลตแบบร่วมนี้ สามารถใช้กับสัญญาณสเปกตรัมแผ่ได้
4. ไม่จำเป็นต้องมีการชิงโครไนซ์ระหว่างผู้ใช้งาน

ข้อเสียของวิธีการจัดลำดับโดยตรง

1. การเริ่มและการรักษาการชิงโครไนซ์ ระหว่างรหัสของสัญญาณที่รับได้กับสัญญาณรหัสที่สร้างขึ้นทางด้านรับทำได้ยาก
2. การที่จะรับสัญญาณได้ถูกต้อง ขบวนการรหัสที่สร้างขึ้น จะต้องชิงโครไนซ์กับขบวนการรหัสที่รับได้ภายในช่วงเวลาของชิป ส่งผลให้ขนาดของแบนด์วิดท์ในทางปฏิบัติถูกจำกัดอยู่ในช่วง 10-20 เมกะเฮิรตซ์
3. กำลังงานของสัญญาณที่รับได้จากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้สถานีฐาน จะมีค่ามากกว่ากำลังงานของสัญญาณจากผู้ใช้งานที่อยู่ไกล ผลกระทบที่เกิดจากอิทธิพลความใกล้-ไกลของสัญญาณ (near-far effect) นี้ สามารถแก้ไขได้โดยใช้การควบคุมกำลังงานซึ่งทำให้สถานีฐานทำการรับสัญญาณจากผู้ใช้งานทั้งหมด ด้วยกำลังงานเฉลี่ยที่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมกำลังงานทำได้ยากในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

เทคนิคการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดในช่องสัญญาณ

4.1 บทนำ

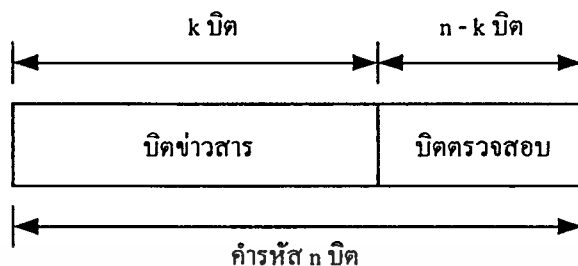
สำหรับการสื่อสารดิจิทัล ขั้นตอนสำคัญอย่างหนึ่งที่จะทำให้การรับ-ส่งข้อมูลเป็นไปได้ อย่างถูกต้อง ก็คือ ระบบต้องมีการเข้ารหัสช่องสัญญาณ เพื่อที่จะตรวจสอบความผิดพลาด และป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการส่งข้อมูล โดยเฉพาะถ้าระบบการสื่อสารนั้นใช้ช่องสัญญาณเป็นชั้นบรรยากาศ ช่องสัญญาณอาจเกิดการเฟดดิ้ง อันเนื่องมาจากการประวิงเวลา การสะท้อน การหักเห และการกระเจิงของส่วนประกอบของสัญญาณได้ ดังนั้นการเข้ารหัสช่องสัญญาณที่มีการเพิ่มเติมบิตตรวจสอบเข้าไปกับบิตข้อมูล จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล และช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบการสื่อสารให้ดียิ่งขึ้นได้ ตัวอย่างของการเข้ารหัสช่องสัญญาณ เช่น การเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้น (linear block code) ที่ข่าวสารจำนวน k บิต จะถูกตามด้วยกลุ่มของรหัสในการแก้ไขจำนวน $n-k$ บิต โดยรหัสที่ใช้แก้ไขจะถูกนำมาใช้ทางด้านรับ เพื่อตรวจสอบรหัสข่าวสารของบล็อกนั้น ๆ ส่วนการเข้ารหัสการประสาน (convolution code) รหัสที่ใช้ในการแก้ไขจะถูกแทรกเข้าระหว่างรหัสของข่าวสาร โดยรหัสแก้ไขไม่เพียงแต่จะใช้ตรวจสอบรหัสในบล็อกข่าวสารที่อยู่ข้างหน้า แต่จะใช้การตรวจสอบรหัสของข่าวสารในบล็อกอื่น ๆ ด้วย สำหรับการเข้ารหัสช่องสัญญาณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ คือ การเข้ารหัสแบบ BCH ซึ่งมีลักษณะเป็นการเข้ารหัสบล็อกเชิงเส้นรูปแบบหนึ่ง

4.2 รหัสบล็อกเชิงเส้น

สัญญาณเอาต์พุตจากตัวเข้ารหัสแหล่งกำเนิดที่มีลักษณะเป็นลำดับข้อมูลไบนารี จะถูกแบ่งออกเป็นบล็อก เพื่อนำไปเข้ารหัสช่องสัญญาณ แต่ละบล็อกประกอบด้วยข่าวสารจำนวน k บิต ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลที่มีรหัสตัวเลขไม่เหมือนกันจำนวน 2^k ข้อมูล ตัวเข้ารหัสจะแปลงข้อมูลแต่ละบล็อกที่มีข่าวสารจำนวน k บิต ให้เป็นลำดับรหัสที่ยาวขึ้นเป็น n บิต รหัสข่าวสารที่ถูกเข้ารหัสใหม่นี้เรียกว่า คำรหัส (code word) และชุดของรหัสข้อมูลที่แตกต่างกันจำนวน 2^k ข้อมูลนี้ จะเรียกว่า รหัสบล็อก (block code) ส่วนที่บิตที่เพิ่มเติมจำนวน $n-k$ บิตเรียกว่า บิตตรวจสอบ (parity check bit) โดยบิตตรวจสอบมีหน้าที่ในการแก้รหัสข้อมูลที่ผิดและไม่มีส่วนที่เป็นข่าวสารอยู่ รหัสที่ได้เรียกว่า รหัส (n, k) และมีอัตราการเข้ารหัส (code rate) แทนด้วยสัญลักษณ์ r หากค่าได้จาก $r=k/n$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูล ต่อจำนวนบิตทั้งหมดที่อยู่ในคำรหัสอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้ารหัสนี้จะเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของระบบการเข้ารหัสด้วย ปกติอัตราการใช้รหัสจะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 ในรูปที่ 4.1 เป็นรูปแสดงการเข้ารหัสบล็อก (n, k)



รูปที่ 4.1 การเข้ารหัสบล็อก (n, k)

กำหนดให้ $c = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1})$ เป็นรหัสที่ใช้ในการส่งเพื่อติดต่อสื่อสาร พารามิเตอร์ที่สำคัญในการเข้ารหัสมีดังนี้ น้ำหนักแฮมมิง (Hamming weight) คือจำนวนบิตในคำรหัสที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เช่น คำรหัส $\underline{v} = 10101100$ จะมีน้ำหนักแฮมมิง $w(\underline{v}) = 4$ และถ้ามีคำรหัสอีกค่าหนึ่งคือ $\underline{u} = 11001010$ ดังนั้นระยะห่างระหว่างคำรหัส 2 คำรหัส เรียกว่าระยะห่างแฮมมิง (Hamming distance) แทนด้วย $d(\underline{v}, \underline{u})$ จากตัวอย่างระยะห่างแฮมมิงมีค่าเท่ากับ 4 และระยะห่างแฮมมิงที่มีค่าต่ำที่สุดสำหรับคำรหัสใด ๆ เรียกว่า ระยะห่างต่ำสุด (minimum distance) แทนด้วย d_{\min} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดของการเข้ารหัส (t) ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$t = \frac{d_{\min} - 1}{2} \quad (4.1)$$

เมื่อพิจารณาให้ $\underline{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ เป็นเวกเตอร์รหัสที่ใช้ส่งผ่านช่องสัญญาณ และ $\underline{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ เป็นเวกเตอร์รหัสที่รับได้ทางด้านรับ แต่เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนอยู่ภายในช่องสัญญาณ ดังนั้นเวกเตอร์ \underline{r} ที่รับได้จะเป็นเวกเตอร์ใดเวกเตอร์หนึ่งในจำนวน 2^n เวกเตอร์ และความแตกต่างระหว่าง \underline{r} และ \underline{v} ก็คือเวกเตอร์ \underline{e} ซึ่งเป็นรูปแบบของรหัสที่ผิด (error vector) เมื่อ $e_i = r_i + v_i = 1$ หมายความว่าเวกเตอร์รหัสที่ส่งมาถูกรบกวนในตำแหน่งบิตที่ i และเนื่องจากในหนึ่งคำรหัส มีบิตจำนวน n บิต ดังนั้นความผิดพลาดบิตจึงเกิดขึ้นได้ 2^n รูปแบบ สำหรับตัวถอดรหัส (decoder) ทางด้านรับมีหน้าที่ตรวจหาเวกเตอร์รหัสที่ส่ง จากเวกเตอร์รหัส \underline{r} ที่รับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปจะประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถอดรหัสบล็อกเชิงเส้นนี้มีหลายวิธี วิธีหนึ่งที่จะกล่าวต่อไปนี้คือ การถอดรหัสด้วยวิธีการประมาณค่าแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (maximum likelihood estimation) ตัวถอดรหัสจะทำการตรวจสอบว่า \underline{y} เป็นเวกเตอร์ที่ใช้ส่ง ซึ่งมีค่าเข้าใกล้เวกเตอร์ \underline{r} โดยดูจากระยะแฮมมิง ตัวถอดรหัสจะสามารถแก้ไขรหัสที่ผิดจำนวน t บิตในเวกเตอร์รหัสที่รับเข้ามาได้ ภายในเงื่อนไขที่ $2t+2 \geq d_{\min} \geq 2t+1$ ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

กำหนดให้ \underline{y} เป็นเวกเตอร์รหัสที่ต้องการส่ง

\underline{u} เป็นเวกเตอร์รหัสใดๆ

\underline{r} เป็นเวกเตอร์รหัสที่รับได้

ระยะห่างแฮมมิงระหว่างเวกเตอร์รหัส \underline{y} , \underline{u} และ \underline{r} จะต้องเป็นไปตามสมการที่ (4.2)

$$d(\underline{y}, \underline{r}) + d(\underline{u}, \underline{r}) \geq d(\underline{u}, \underline{y}) \quad (4.2)$$

ถ้ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น t' บิต ($t' < t$) ดังนั้นระยะห่างแฮมมิงระหว่าง \underline{y} กับ \underline{r} คือ $d(\underline{y}, \underline{r}) = t'$ แต่เนื่องจาก $d(\underline{y}, \underline{u}) \geq d_{\min} \geq 2t+1$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (4.2) จึงได้ว่า

$$\begin{aligned} d(\underline{u}, \underline{r}) &\geq 2t+1-t' \\ d(\underline{u}, \underline{r}) &\geq t+1 \\ d(\underline{u}, \underline{r}) &\geq t' \end{aligned} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) แสดงให้เห็นว่า ถ้าในคำรหัสมีบิตผิดพลาดจำนวนเท่ากับหรือน้อยกว่า t บิต เวกเตอร์รหัส \underline{r} ที่รับได้จะเข้าใกล้เวกเตอร์รหัส \underline{y} มากกว่าเวกเตอร์รหัส \underline{u} ดังนั้นตัวถอดรหัสจะสามารถถอดรหัสได้ถูกต้อง แต่ถ้าคำรหัสมีบิตผิดไปจำนวน $e \geq t+1$ บิต ตัวถอดรหัสจะไม่สามารถแก้ไขบิตผิดพลาดนั้นได้

นอกจากการถอดรหัสด้วยวิธีการประมาณค่าแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุดแล้ว ยังมีวิธีการตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของบิตข้อมูลได้อีกวิธีหนึ่ง คือการตรวจสอบและคำนวณเวกเตอร์ซินโดรม (Syndrome vector) $\underline{s} = \underline{r}H^T$ ถ้าหากว่าเวกเตอร์รหัสที่รับได้ \underline{r} เป็นเวกเตอร์รหัสที่ส่งมา เวกเตอร์ซินโดรม \underline{s} จะเป็นศูนย์ แต่ถ้าเกิดความผิดพลาดในการส่ง เวกเตอร์ซินโดรม \underline{s} จะไม่เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การเข้ารหัสแบบ BCH

รหัสแบบ BCH เป็นรหัสที่มีลักษณะเป็นรหัสบล็อกเชิงเส้นชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกค้นพบโดย Hocquenghem ในปี ค.ศ. 1959 และโดย Bose กับ Chaudhuri ในปี ค.ศ. 1960 และมีจุดที่น่าสนใจสองประการคือ การเข้ารหัสและการคำนวณซินโดรมทำได้ง่าย โดยการใช้ชิฟต์รีจิสเตอร์ที่มีการป้อนกลับ (linear feedback shift register) และลักษณะสอดคล้องกับโครงสร้างพีชคณิต ทำให้การถอดรหัสดำเนินการได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ

พารามิเตอร์ที่แสดงคุณสมบัติของรหัสแบบ BCH มีดังต่อไปนี้ คือ

ความยาวบล็อกรหัส	$n = 2^m - 1$
จำนวนของบิตตรวจสอบ	$n - k \leq mt$
ความยาวของข่าวสาร	$k \geq 2^m - 1 - mt$
ระยะห่างต่ำสุด	$d_{\min} \geq 2t + 1$

เมื่อ m และ t คือเลขจำนวนเต็มใดๆ ที่ $t < 2^{m-1}$

จะเห็นได้ว่ารหัสแบบ BCH นี้ มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดได้จำนวนเท่ากับหรือน้อยกว่า t บิต บางครั้งรหัสนี้จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า t -error correcting of BCH

รหัสแบบ BCH จะถูกกำหนดอยู่ในเทอมของรากของเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล (generator polynomial) เมื่อพิจารณารหัส t -error correcting ของ BCH ที่มีความยาวของคำรหัส $n = 2^m - 1$ จะมีไพรมิตีฟอิลิเมนต์ (primitive element) ของ $GF(2^m)$ ซึ่งแทนด้วย α^m ที่เป็นรากของเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล โดยที่เจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียลของรหัส BCH เป็นผลคูณของโพลิโนเมียลต่ำสุด (minimal polynomial) ที่สอดคล้องกับ α^i

กำหนดให้ $m_i(x)$ เป็นโพลิโนเมียลต่ำสุดของ α^i ดังนั้นเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียลของ t -error correcting ของ BCH ซึ่งหาได้จากตัวคูณร่วมน้อย (Least common multiple: LCM) ของ $m_1(x), m_2(x), \dots, m_{2t}(x)$ แสดงได้ดังสมการที่ (4.4)

$$g(x) = LCM\{m_1(x), m_2(x), \dots, m_{2t}(x)\} \quad (4.4)$$

โดยที่ $\alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{2t}$ เป็นรากของ $g(x)$ นั่นคือ $g(\alpha^i) = 0$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, 2t$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 4.4 ทุก ๆ กำลังคู่ของ α จะให้โพลิโนเมียลต่ำสุดเหมือนกัน และเหมือนกับกำลังคี่ของ α ในลำดับของสมการที่ (4.4) ผลที่ได้คือเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียลของรหัสแบบ BCH ของสมการที่ (4.4) จะลดลงเหลือ

$$g(x) = LCM\{m_1(x), m_3(x), \dots, m_{2^m-1}(x)\} \quad (4.5)$$

โดยที่อันดับของแต่ละโพลิโนเมียลต่ำสุดเท่ากับหรือน้อยกว่า m ดังนั้นอันดับของเจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียลมากที่สุดคือ mt หรืออีกนัยหนึ่งคือ บิตตรวจสอบจะมีจำนวนไม่เกิน mt บิตปกติไม่มีสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาบิตตรวจสอบ แต่ถ้าความยาวของบล็อกรหัส $n = 2^m - 1$ เมื่อ $m \leq 10$ จะได้ตัวอย่างของพารามิเตอร์ของรหัสแบบ BCH ที่ใช้โพลิโนเมียลที่มีอันดับต่ำกว่า 2^{10} แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางตัวอย่างพารามิเตอร์ของรหัสแบบ BCH ที่ใช้โพลิโนเมียลที่มีอันดับต่ำกว่า 2^{10}

n	k	t	เจนเนอเรเตอร์โพลิโนเมียล
7	4	1	13
15	11	1	23
15	7	2	721
15	5	3	2467
31	26	1	45
31	21	2	3551
31	16	3	107657
31	11	5	5423325
31	6	7	313365047
63	57	1	103
63	51	2	12471
63	45	3	1701317
63	39	4	166623567
63	36	5	1033500423

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

n	k	t	เจนเนอเรเตอร์โพลีโนเมียล
63	30	6	157464165547
63	24	7	17323260404441
63	18	10	1363026512351725
63	16	11	6331141367235453
63	10	13	472622305527250155
63	7	15	5231045543503271737
127	120	1	211
127	113	2	41567
127	106	3	11554743
127	99	4	3447023271
127	92	5	624730022327
127	85	6	130704476322273
127	78	7	26230002166130115
127	71	9	6255010713253127753
127	64	10	1206534025570773100045
127	57	11	335265252505705053517721
255	247	1	435
255	239	2	267543
255	231	3	156720665
255	223	4	75626641375
255	215	5	23157564726421
255	207	6	16176560567636227
255	199	7	7633031270420722341
255	191	8	2663470176115333714567
255	187	9	52755313540001322236351
255	179	10	22624710717340432416300455
511	502	1	1021
511	493	2	1112711

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การถอดรหัสแบบ BCH

สำหรับกระบวนการถอดรหัสแบบ BCH จะแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 การคำนวณหาซินโดรม $S = (S_1, S_2, \dots, S_{2t})$ จากเวกเตอร์รหัสที่รับได้ \underline{r}

ขั้นที่ 2 การหาโพลิโนเมียล $\sigma(x)$ ของตำแหน่งรหัสที่ผิด

ขั้นที่ 3 การคำนวณหาตำแหน่งของรหัสที่ผิดจากรากของ $\sigma(x)$

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาซินโดรม จากเวกเตอร์ที่รับได้

กำหนดให้ $v(x)$ เป็นเวกเตอร์รหัสที่ถูกส่งออกไป หากทำได้ดังสมการที่ (4.6)

$$v(x) = v_0 + v_1x + v_2x^2 + \dots + v_{n-1}x^{n-1} \quad (4.6)$$

และกำหนดให้ $r(x)$ เป็นเวกเตอร์ที่รับได้ หากทำได้ดังสมการที่ (4.7)

$$r(x) = r_0 + r_1x + r_2x^2 + \dots + r_{n-1}x^{n-1} \quad (4.7)$$

ดังนั้นรูปแบบของรหัสที่เกิดความผิดพลาด เนื่องจากช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแสดงได้ดังสมการที่ (4.8)

$$e(x) = r(x) + v(x) \quad (4.8)$$

สำหรับการถอดรหัส BCH ซินโดรมจะถูกกำหนดเป็นเวกเตอร์ S ที่มีจำนวนอีลิเมนต์เท่ากับ $2t$ ดังแสดงในสมการที่ (4.9)

$$\begin{aligned} S &= r(\alpha^i) \\ &= r_0 + r_1(\alpha^i) + r_2(\alpha^i)^2 + \dots + r_{n-1}(\alpha^i)^{n-1} \end{aligned} \quad (4.9)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, 2t$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.8) และ (4.9) จะได้

$$S = v(\alpha^i) + e(\alpha^i)$$

แต่เนื่องจาก $\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^{2t}$ ต่างเป็นรากของ $v(x)$ นั่นคือ $v(\alpha^i) = 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$S = e(\alpha^i) \quad i = 1, 2, \dots, 2t \quad (4.10)$$

สมมติว่า $e(x)$ เป็นรูปแบบของรหัสที่ผิดไป ν บิต

$$e(x) = x^{j_1} + x^{j_2} + \dots + x^{j_\nu}$$

จากสมการที่ (4.10) ทำให้ได้

$$\begin{aligned} S_1 &= \alpha^{j_1} + \alpha^{j_2} + \dots + \alpha^{j_\nu} \\ S_2 &= (\alpha^{j_1})^2 + (\alpha^{j_2})^2 + \dots + (\alpha^{j_\nu})^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$S_{2t} = (\alpha^{j_1})^{2t} + (\alpha^{j_2})^{2t} + \dots + (\alpha^{j_\nu})^{2t}$$

โดยที่พารามิเตอร์ α^{j_λ} จะเรียกว่า error-location number เมื่อ $\lambda = 1, 2, \dots, \nu$ และสมการที่ (4.11) เป็นที่รู้จักในชื่อ power-sum symmetric function ดังนั้นกระบวนการถอดรหัส BCH จึงเป็นวิธีของการแก้สมการ power-sum symmetric function เหล่านี้ และหาค่า error-location number (α^{j_λ}) ที่ไม่ทราบค่าจากส่วนประกอบของเวกเตอร์ซินโดรม

ขั้นตอนที่ 2 การหาโพลิโนเมียล $\sigma(x)$ ของตำแหน่งรหัสที่ผิด

สำหรับการหาโพลิโนเมียลของตำแหน่งรหัสที่ผิดที่ใช้ในที่นี้ คือ เทคนิคแบบบิทเทอร์ที่ฟอย่างง่ายที่ใช้กับรหัส BCH ที่เป็นเลขฐานสอง มีชื่อเรียกว่า Fast Iterative algorithm for $\sigma(x)$ โดยการคำนวณหา $\sigma(x)$ มีเพียง t ขั้นตอน เริ่มจากการคำนวณหาส่วนที่เหลือจากตารางต่อไปนี้

μ	$\sigma^{(\mu)}(x)$	d_μ	l_μ	$2\mu - l_\mu$
-1/2	1	1	0	-1
0	1	S	0	0
1				
:				
t				

สมมติว่าเติมค่าต่าง ๆ ในตารางจนถึงบรรทัดที่ μ แล้ว จากนั้นทำการคำนวณบรรทัดที่ $\mu+1$ โดยมีวิธีดังนี้

- 1) ถ้า $d_\mu = 0$ ดังนั้น $\sigma^{(\mu+1)}(x) = \sigma^{(\mu)}(x)$
- 2) ถ้า $d_\mu \neq 0$ ให้หาจาก 2 บรรทัดใด ๆ ก่อนบรรทัดที่ μ คือบรรทัดที่ ρ ซึ่งจะได้ค่าของ $2\rho - l_\rho$ ที่มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในคอลัมน์สุดท้ายของตาราง โดยที่ $d_\rho \neq 0$ ดังนั้น

$$\sigma^{(\mu+1)}(x) = \sigma^{(\mu)}(x) + d_\mu d_\rho^{-1} x^{2(\mu-\rho)} \sigma^{(\rho)}(x)$$

จะได้ $l_{\mu+1}$ เป็นดีกรีของ $\sigma^{(\mu+1)}(x)$ ซึ่งหาค่าได้จาก $l_{\mu+1} = \max[l_\mu, l_\rho + 2(\mu - \rho)]$ ส่วนความแตกต่างที่ขั้นตอนที่ $\mu+1$ คือ

$$d_{\mu+1} = S_{2\mu+3} + \sigma_1^{(\mu+1)} S_{2\mu+2} + \sigma_2^{(\mu+1)} S_{2\mu+1} + \dots + \sigma_{l_{\mu+1}}^{(\mu+1)} S_{2\mu+3-l_{\mu+1}}$$

โดยที่โพลิโนเมียล $\sigma^{(i)}(x)$ ในบรรทัดสุดท้ายก็คือ $\sigma(x)$ ที่ต้องการ ถ้าหาก $\sigma(x)$ มีอันดับสูงกว่าค่า t แล้ว จะทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งของรหัสที่ผิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณตำแหน่งของรหัสที่ผิด และการแก้รหัสที่ผิด

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการถอดรหัส BCH โดยตำแหน่งของรหัสที่ผิดจะอยู่คู่กับกับรากของ $\sigma(x)$ โดยที่รากของ $\sigma(x)$ สามารถหาได้จากการแทน $1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{n-1}$ ลงใน $\sigma(x)$ เนื่องจาก $\alpha^n = 1$ และ $\alpha^{-1} = \alpha^{n-1}$ ดังนั้นถ้า α^i เป็นรากของ $\sigma(x)$ แล้ว จะได้ว่า α^{n-i} เป็นตำแหน่งของบิตที่ผิด

ตัวอย่างของการคำนวณเพื่อแก้รหัสที่ผิดไป 3 บิต

กำหนดความยาวรหัสเป็น $2^5 - 1 = 31$ บิต และเวกเตอร์รหัสที่ส่งเป็นศูนย์ทั้งหมด คือ $v = (000\dots 0)$ และสมมติให้เวกเตอร์รหัสที่รับได้คือ $r(x) = x + x^{12} + x^{25}$ จากสมการที่ (4.9) และตารางใน [6] จะได้

$$\begin{aligned} S_1 &= r(\alpha) = 1 + \alpha^2 + \alpha^4 = \alpha^{22} \\ S_2 &= r(\alpha^2) = 1 + \alpha^4 + \alpha^8 = \alpha^2 + \alpha^3 + \alpha^4 = \alpha^{13} \\ S_3 &= r(\alpha^3) = 1 + \alpha^6 + \alpha^7 = 1 + \alpha^4 = \alpha^{10} \\ S_4 &= r(\alpha^4) = 1 + \alpha^8 + \alpha^{16} = 1 + \alpha^2 + \alpha^4 = \alpha^{26} \\ S_5 &= r(\alpha^5) = \alpha^{10} + \alpha^{15} = \alpha^2 + \alpha^3 = \alpha^{12} \\ S_6 &= r(\alpha^6) = 1 + \alpha^{12} + \alpha^{18} = \alpha^2 + \alpha^3 = \alpha^{20} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้เวกเตอร์ซินโดรมคือ

$$\begin{aligned} S &= (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6) \\ &= (\alpha^{22}, \alpha^{13}, \alpha^{10}, \alpha^{26}, \alpha^{12}, \alpha^{20}) \end{aligned}$$

จากกระบวนการอิทเทอเรทีฟ จะได้ขั้นตอนดังต่อไปนี้ เมื่อเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

$$\sigma^{(-1/2)}(x) = 1 \quad l_{-1/2} = 0 \quad d_{-1/2} = 1$$

$$\sigma^{(0)}(x) = 1 \quad l_0 = 0 \quad d_0 = S_1 \neq 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ให้ $\mu=0$ และ $\rho=-1/2$

$$\begin{aligned}\sigma^{(1)}(x) &= \sigma^{(0)}(x) + d_0 d_{-1/2}^{-1} x \sigma^{(-1/2)}(x) \\ &= 1 + \alpha^{22} x \\ l_1 &= \max[l_0, l_{-1/2} + 2(0 + 1/2)] \\ &= \max[0, 0 + 1] = 1 \\ d_1 &= S_3 + S_2 \sigma_1^{(1)} = \alpha^0 + \alpha^4 = 1\end{aligned}$$

2. ให้ $\mu=1$ และ $\rho=0$

$$\begin{aligned}\sigma^{(2)}(x) &= \sigma^{(1)}(x) + d_1 d_0^{-1} x^2 \sigma^{(0)}(x) \\ &= 1 + \alpha^{22} x + S_1^{-1} x^2 = 1 + \alpha^{22} x + \alpha^9 x^2 \\ l_2 &= \max[l_1, l_0 + 2(1 - 0)] \\ &= \max[1, 0 + 2] = 2 \\ d_2 &= S_5 + S_4 \sigma_1^{(2)} + S_3 \sigma_2^{(2)} \\ &= \alpha^{12} + \alpha^{17} + \alpha^{19} = \alpha^{16}\end{aligned}$$

3. ให้ $\mu=2$ และ $\rho=1$

$$\begin{aligned}\sigma^{(3)}(x) &= \sigma^{(2)}(x) + d_2 d_1^{-1} x^2 \sigma^{(1)}(x) \\ &= 1 + \alpha^{22} x + \alpha^9 x^2 + \alpha^{16} x^2 (1 + \alpha^{22} x) \\ &= 1 + \alpha^{22} x + x^2 + \alpha^7 x^3\end{aligned}$$

จะได้ว่า โพลีโนเมียลของตำแหน่งรหัสที่ผิดคือ

$$\sigma(x) = \sigma^{(3)}(x) = 1 + \alpha^{22} x + x^2 + \alpha^7 x^3$$

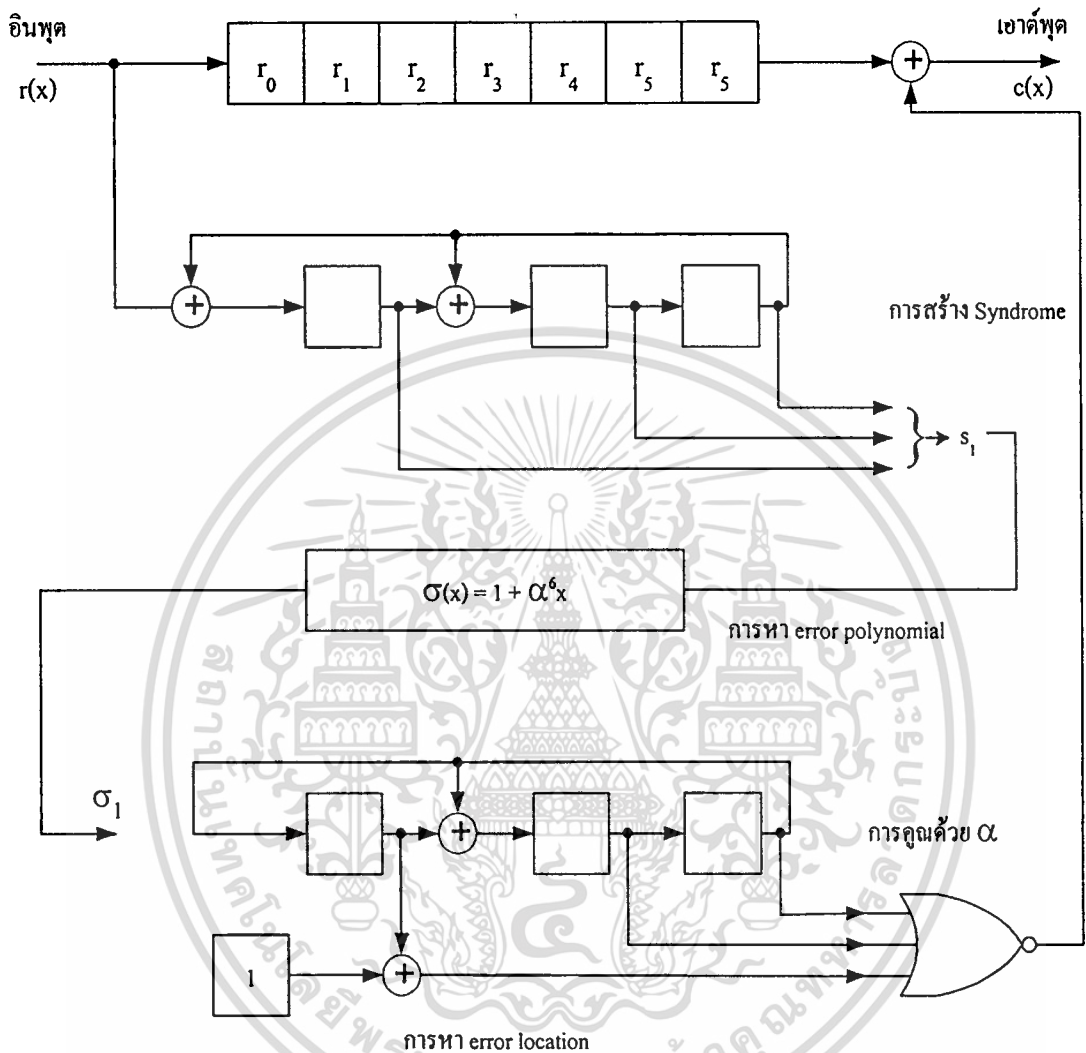
เมื่อแทนค่า $1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{30}$ ลงใน $\sigma(x)$ พบว่า α^6, α^{19} และ α^{30} เป็นรากของ $\sigma(x)$ ดังนั้น

ตำแหน่งรหัสที่ผิดคือ α^{25}, α^{12} และ α โดยรูปแบบของรหัสที่ผิดคือ $e(x) = x + x^{12} + x^{25}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปที่ 4.2 เป็นตัวอย่างของวงจรถอดรหัส BCH (7,4) ที่มีความสามารถแก้บิตผิดได้ 1 บิต ถ้า การเข้ารหัส BCH ที่มีความสามารถแก้ไขบิตผิดได้มากขึ้น วงจรก็必将มีความซับซ้อนมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.2 วงจรถอดรหัส สำหรับรหัส BCH (7,4) ที่มีความสามารถแก้บิตผิดได้ 1 บิต

สำหรับการเข้ารหัสแบบ BCH นั้น จำนวนคำรหัส n และจำนวนข่าวสาร k จะเป็นไปตามคุณสมบัติ คือ $n = 2^m - 1$ และ $k \geq 2^m - 1 - mt$ เมื่อ $m = 2, 3, 4, \dots$ แต่ในทางปฏิบัติ จำนวนข่าวสารที่ต้องการเข้ารหัสในระบบต่าง ๆ จะมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการดัดแปลงรหัส (Modified code) ให้เหมาะสมกับแต่ละระบบจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ การดัดแปลงรหัสนั้นแบ่งได้หลายลักษณะ ตัวอย่างเช่น shortened code, lengthened code, punctured code และ extended code ในที่นี้ทำการยกตัวอย่าง การดัดแปลงรหัสแบบ shortened code จากรูปที่ 4.3 แสดงกระบวนการเข้ารหัสของรหัสแบบ shortened BCH โดยขั้นตอนในการเข้ารหัสแสดงดังต่อไปนี้

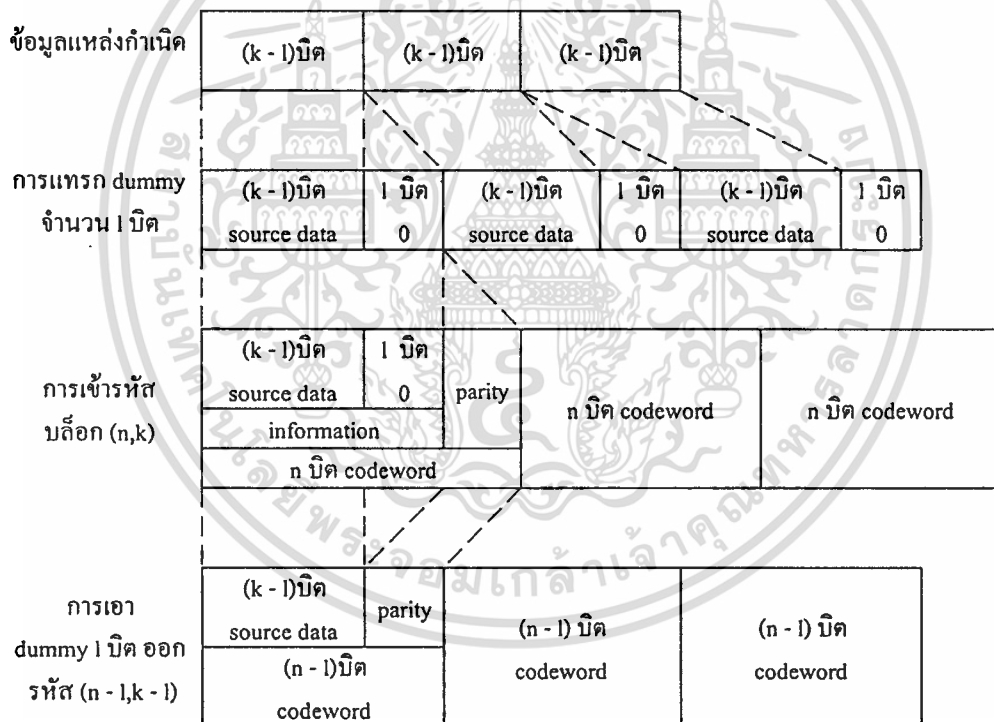
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลำดับข้อมูลจากแหล่งกำเนิด จะถูกแบ่งออกเป็นบล็อก ๆ ละ $k-l$ บิต
- ทำการเพิ่มบิต 0 จำนวน l บิต ต่อท้ายจากบล็อกข้อมูล $k-l$ บิต
- นำบิตรวมทั้งหมด k บิต มาทำการเข้ารหัสเป็นคำรหัสจำนวน n บิต
- ย้ายบิต 0 จำนวน l บิตออกจากคำรหัส เพื่อสร้างเป็นคำรหัสใหม่ขึ้นมา

ด้วยกระบวนการข้างต้นจึงสามารถสร้างรหัสแบบ BCH $(n-l, k-l, t)$ ขึ้นมาได้ สำหรับการถอดรหัสนั้น ก็จะใช้กระบวนการที่ตรงกันข้ามกับการเข้ารหัส แสดงได้ดังนี้

- แทรกบิต 0 จำนวน l บิต เข้าไประหว่างบิตข้อมูล $k-l$ บิต กับบิตตรวจสอบ เพื่อสร้างเป็นรหัสแบบ BCH (n, k, t) กลับคืนมา

- ทำการถอดรหัสของรหัสที่มีการเพิ่มบิต 0 เข้าไป โดยใช้กระบวนการเช่นเดียวกับการถอดรหัสแบบ BCH ทั่วไป



รูปที่ 4.3 การเข้ารหัสแบบ shortened BCH

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลของการเข้ารหัส BCH ในระบบ ATM ไร้สาย ที่ใช้วิธีการเข้าถึงแบบ DS/CDMA

5.1 แบบจำลองของระบบที่ทำการวิเคราะห์

ระบบ ATM ไร้สายที่พิจารณานั้น มีทั้งระบบที่ไม่มีการเข้ารหัส และระบบที่มีการเข้ารหัสแบบ BCH โดยส่วนที่แตกต่างกันระหว่าง 2 ระบบ คือ กำลังงานส่งที่ใช้ด้านส่ง เพราะระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสข้อมูล กำลังงานส่ง (P) กำหนดให้เป็นกำลังงานเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากันสำหรับผู้ใช้งานทุกคน แต่สำหรับระบบที่มีการเข้ารหัสนั้น กำลังงานส่ง (P_c) จะมีเทอมของอัตราการใช้รหัสเพิ่มเข้ามา ในที่นี้จะนำเสนอระบบที่ทำการเข้ารหัสเป็นหลัก

5.1.1 แบบจำลองเครื่องส่ง

แบบจำลองของระบบที่พิจารณาประกอบด้วยผู้ใช้งานจำนวน K คน หลังจากที่ได้รับข้อมูลผ่านออกมาจากตัวเข้ารหัสของสัญญาณ ลำดับข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคูณกับลำดับรหัส โดยที่ผู้ใช้งานแต่ละคนจะมีลำดับรหัสที่แตกต่างกัน กำหนดให้ลำดับข้อมูลและลำดับรหัสเป็นเลขฐานสอง และใช้การมอดูเลตแบบเชิงเลขทางเฟสฐานสอง (BPSK) ดังนั้นสัญญาณที่ส่งออกของผู้ใช้งานลำดับที่ k แสดงดังสมการที่ (5.1)

$$S^{(k)}(t) = \sqrt{2P_c} a^{(k)}(t) b^{(k)}(t) \cos(\omega_c t + \theta^{(k)}) \quad (5.1)$$

โดยที่ P_c คือ กำลังงานส่งเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากันทุกผู้ใช้งาน สำหรับระบบที่ทำการเข้ารหัส

$$\text{หาค่าได้จาก } P_c = \frac{E_c}{T} = \frac{R_c E_b}{T}$$

$a^{(k)}(t)$ คือ ลำดับรหัสของผู้ใช้งานลำดับที่ k เป็นสัญญาณพัลส์เลขฐานสองที่มีแอมพลิจูดเป็น $(-1,1)$ และมีความกว้างเท่ากับ T_c

$b^{(k)}(t)$ คือ ลำดับข้อมูลของผู้ใช้งานลำดับที่ k เป็นสัญญาณพัลส์เลขฐานสองที่มีแอมพลิจูดเป็น $(-1,1)$ และมีความกว้างเท่ากับ T

$\theta^{(k)}$ คือ มุมเฟสการมอดูเลตของผู้ใช้งานลำดับที่ k ที่มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) บนช่วง $[0, 2\pi]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ω_c คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นพาห้

ส่วน $N \equiv T/T_c$ คือ ค่าอัตราขยายการประมวลผลของระบบ

5.1.2 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณที่พิจารณา มีคุณสมบัติเป็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอย่างช้า ๆ สัญญาณมีลักษณะของเฟดดิ้งในหลายเส้นทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อน การหักเห และการรับสัญญาณโดยตรงในช่องสัญญาณ สำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือแบบจำลองช่องสัญญาณแบบนาคากามิ เพราะเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้แสดงการแจกแจงของแอมพลิจูดของสัญญาณในรูปแบบอื่น ๆ ได้ด้วย โดยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (pdf) ของสัญญาณที่รับได้ของผู้ใช้งานในเส้นทางที่ l แสดงได้ดังสมการ

$$p_{\beta_l}(\beta_l) = 2 \left(\frac{m_l}{\Omega_l} \right)^{m_l} \frac{\beta_l^{2m_l-1}}{\Gamma(m_l)} \exp\left(-\frac{m_l}{\Omega_l} \beta_l^2\right) \quad (5.2)$$

เมื่อ
$$m_l = \frac{\Omega_l^2}{E[(\beta_l^2 - \Omega_l)^2]} \geq 0.5, \quad \Omega_l = E[\beta_l^2]$$

โดยที่ m_l คือ ตัวแปรเสริมเฟดดิ้งของการแจกแจงของแอมพลิจูดในช่องสัญญาณในเส้นทางที่ l มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของค่าโมเมนต์อันดับที่สองยกกำลังสองต่อค่าความแปรปรวน

$\Gamma(m_l)$ คือ ฟังก์ชันแกมมา

Ω_l คือ โมเมนต์อันดับที่สอง

ถ้าตัวแปรเสริมเฟดดิ้ง $m = 1.0$ คือ การแจกแจงแบบ Rayleigh $m = 0.5$ คือ การแจกแจงแบบ Gaussian ข้างเดียว และ $m \rightarrow \infty$ คือ กรณีที่ไม่มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณ

5.1.3 แบบจำลองเครื่องรับ

สำหรับระบบที่พิจารณาประกอบด้วยสัญญาณที่รับได้จากผู้ใช้งานหลายคน และสัญญาณที่รับได้เกิดเฟดดิ้งแบบหลายเส้นทาง และเนื่องจากช่องสัญญาณเป็นฟังก์ชันของอัตราการลดทอนของแอมพลิจูด การประวิงเวลา และการประวิงเฟส ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จึงเกิดการประวิงเวลาและแอมพลิจูดของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราการลดทอนของแอมพลิจูด ดังแสดงในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r(t) = n(t) + \sqrt{2P_c} \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \beta_l^{(k)} a^{(k)}(t - \tau_l^{(k)}) b^{(k)}(t - \tau_l^{(k)}) \cos(\omega_c t + \varphi_l^{(k)}) \quad (5.3)$$

โดยที่ $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก(AWGN)ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณเท่ากับ $\eta_0/2$

$\beta_l^{(k)}$ คือ อัตราการลดทอนแอมพลิจูดในเส้นทางที่ l ของผู้ใช้งานลำดับที่ k

$\tau_l^{(k)}$ คือ เวลาประวิงของเฟดดิ้งในเส้นทางที่ l ของผู้ใช้งานลำดับที่ k ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน

และมีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอบนช่วง $[0, T]$

$\varphi_l^{(k)}$ คือ มุมเฟสของเฟดดิ้งในเส้นทางที่ l ของผู้ใช้งานลำดับที่ k ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน

และมีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอบนช่วง $[0, 2\pi]$

$L^{(k)}$ คือ จำนวนเส้นทางที่เกิดจากการหักเหและการสะท้อนภายในช่องสัญญาณที่สามารถแก้ไขได้ โดยเครื่องรับแบบเรก

สำหรับเครื่องรับที่พิจารณา ใช้เครื่องรับแบบเรกที่แต่ละเส้นทางที่แมตช์กับสาขาของเครื่องรับประกอบด้วยสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการแทรกสอด กำหนดให้ผู้ใช้งานลำดับที่ 1 เป็นผู้ใช้งานอ้างอิง ดังนั้นเอาต์พุตของเครื่องรับแบบเรกสำหรับแต่ละเวลาในการสุ่ม [7], [8] แสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} U &= \sum_{n=0}^{L_r-1} \int_{nT_c}^{T+nT_c} r(t) \beta_n^{(1)} a^{(1)}(t - nT_c) \cos(\omega_c t + \varphi_n^{(1)}) dt \\ &= \sum_{n=0}^{L_r-1} \int_{nT_c}^{T+nT_c} [n(t) + \sqrt{2P_c} \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \beta_l^{(k)} a^{(k)}(t - \tau_l^{(k)}) b^{(k)}(t - \tau_l^{(k)}) \\ &\quad \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_l^{(k)})] \beta_n^{(1)} a^{(1)}(t - nT_c) \cos(\omega_c t + \varphi_n^{(1)}) dt \\ &= \sum_{n=0}^{L_r-1} \{S^{(n)} + I_{mai}^{(n)} + I_{si}^{(n)} + I_{ni}^{(n)}\} \end{aligned} \quad (5.4)$$

เมื่อพิจารณาเอาต์พุตของเครื่องรับแบบเรกแยกเป็นส่วน ๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ส่วนของสัญญาณที่ต้องการ ($S^{(n)}$)

เงื่อนไขที่พิจารณา คือ $k=1$ และ $n=l$ กำหนดให้ $\tau_l^{(k)} = \tau_0^{(k)} + lT_c$ เนื่องจาก $\tau_0^{(1)} = 0$ จึงทำให้ได้ $\tau_l^{(k)} = lT_c$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (5.4) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned} S^{(n)} &= \sqrt{2P_c} \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \int_{nT_c}^{T+nT_c} (\beta_l^{(1)})^2 (a^{(1)}(t-lT_c))^2 b^{(1)}(t-lT_c) \cos^2(\omega_c t + \varphi_l^{(1)}) dt \\ &= \sqrt{\frac{P_c}{2}} \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} (\beta_l^{(1)})^2 \int_{nT_c}^{T+nT_c} b^{(1)}(t-lT_c) dt \\ &= \sqrt{\frac{P_c}{2}} b_0^{(1)} T \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} (\beta_l^{(1)})^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

- ส่วนของสัญญาณรบกวนเนื่องจากผู้ใช้งานคนอื่น (multiple access interference) ($I_{mai}^{(n)}$)

เงื่อนไขที่พิจารณา คือ $k > 1$ กำหนดให้ $\tau_{nl}^{(k)} = \tau_l^{(k)} - \tau_n^{(1)}$ เนื่องจาก $\tau_n^{(1)} = nT_c$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (5.4) และจัดรูปใหม่จะได้

$$I_{mai}^{(n)} = \sqrt{\frac{P_c}{2}} \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \beta_l^{(k)} \beta_n^{(1)} \cos(\varphi_l^{(k)} - \varphi_n^{(1)}) \int_0^T a^{(k)}(t_1 - \tau_{nl}^{(k)}) a^{(1)}(t_1) b^{(k)}(t_1 - \tau_{nl}^{(k)}) dt_1$$

กำหนดให้ $\varphi_{nl}^{(k)} = \varphi_l^{(k)} - \varphi_n^{(1)}$ และจาก [9] จะได้ว่า

$$I_{mai}^{(n)} = \sqrt{\frac{P_c}{2}} \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \beta_l^{(k)} \beta_n^{(1)} \cos(\varphi_{nl}^{(k)}) \{b_{-1}^{(k)} R_{k1}(\tau_{nl}^{(k)}) + b_0^{(k)} \hat{R}_{k1}(\tau_{nl}^{(k)})\} \quad (5.6)$$

โดยที่ $b_0^{(1)}$ คือ บิตข้อมูลปัจจุบัน

$b_{-1}^{(1)}$ คือ บิตข้อมูลก่อนหน้า

- ส่วนของสัญญาณรบกวนการแทรกสอดตัวเองสำหรับผู้ใช้งานอ้างอิง (self interference) ($I_{si}^{(n)}$)

มีเงื่อนไข คือ $k = 1$ และในทำนองเดียวกับการหา $I_{mai}^{(n)}$ จะได้

$$I_{si}^{(n)} = \sqrt{\frac{P_c}{2}} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq n}}^{L^{(k)}-1} \beta_l^{(1)} \beta_n^{(1)} \cos(\varphi_{nl}^{(1)}) \{b_{-1}^{(1)} R_{11}(\tau_{nl}^{(k)}) + b_0^{(1)} \hat{R}_{11}(\tau_{nl}^{(k)})\} \quad (5.7)$$

- ส่วนของสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก (AWGN) ($I_{ni}^{(n)}$)

$$I_{ni}^{(n)} = \int_{nT_c}^{T+nT_c} n(t) \beta_n^{(1)} a^{(1)}(t-nT_c) \cos(\omega_c t + \varphi_n^{(1)}) dt \quad (5.8)$$

สำหรับการวิเคราะห์ระบบ สมมติให้การแทรกสอด (interference) มีการแจกแจงแบบเกาส์ ดังนั้นส่วนของสัญญาณรบกวนจึงจำลองเป็นสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวกที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนเป็นกำลังของสัญญาณรบกวน หากค่าได้จาก $\sigma^2 = E(I^2)$ แบ่งออกเป็น ส่วน ๆ ดังนี้

- กำลังของสัญญาณรบกวนเนื่องจากผู้ใช้งานอื่น (MAI)

$$\sigma_{mai,n}^2 = \frac{P_c}{2} \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} (\beta_n^{(1)})^2 E[(\beta_l^{(k)})^2] E[\cos^2(\varphi_{nl}^{(k)})] E[(b_{-1}^{(k)} R_{k1}(\tau_{nl}^{(k)}) + b_0^{(k)} \hat{R}_{k1}(\tau_{nl}^{(k)}))^2]$$

จาก [8] และกำหนดให้ $\Omega_l^{(k)} = E[(\beta_l^{(k)})^2]$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sigma_{mai,n}^2 &= \frac{P_c}{2} \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} (\beta_n^{(1)})^2 \Omega_l^{(k)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{2T^2}{3N} \\ &= \frac{R_c E_b T}{6N} (\beta_n^{(1)})^2 \sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(k)} \end{aligned} \quad (5.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำลังของสัญญาณรบกวนการแทรกสอดตัวเอง (SI)

ทำนองเดียวกับ $\sigma_{mai,n}^2$ จะได้

$$\begin{aligned}\sigma_{si,n}^2 &= \frac{P_c}{2} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq n}}^{L^{(1)}-1} (\beta_n^{(1)})^2 E[(\beta_l^{(1)})^2] E[\cos^2(\varphi_{nl}^{(1)})] E[(b_{-1}^{(1)} R_{kl}(\tau_{nl}^{(1)}) + b_0^{(1)} \hat{R}_{kl}(\tau_{nl}^{(1)}))^2] \\ &= \frac{R_c E_b T}{4N} (\beta_n^{(1)})^2 \sum_{l=1}^{L^{(1)}-1} \Omega_l^{(1)}\end{aligned}\quad (5.10)$$

- กำลังของสัญญาณรบกวนเกาส์ขาวแบบบวก (AWGN)

$$\begin{aligned}\sigma_{ni,n}^2 &= E\left[\int_{nT_c}^{T+nT_c} n^2(t) (\beta_n^{(1)})^2 (a^{(1)}(t-nT_c))^2 \cos^2(\omega_c t + \varphi_n^{(1)}) dt\right] \\ &= E\left[\frac{1}{2} T (\beta_n^{(1)})^2 \frac{\eta_0}{2}\right] \\ &= \frac{T\eta_0}{4} (\beta_n^{(1)})^2\end{aligned}\quad (5.11)$$

ดังนั้น ความแปรปรวนทั้งหมด จึงหาได้จากกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมด ดังแสดงในสมการ

$$\begin{aligned}\sigma_T^2 &= \sum_{n=0}^{L_c-1} (\sigma_{mai,n}^2 + \sigma_{si,n}^2 + \sigma_{ni,n}^2) \\ &= R_c E_b T \left[\frac{\sum_{k=2}^K \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \Omega_l^{(k)}}{6N} + \frac{\sum_{l=1}^{L^{(1)}-1} \Omega_l^{(1)}}{4N} + \frac{\eta_0}{4R_c E_b} \right] \sum_{n=0}^{L_c-1} (\beta_n^{(1)})^2\end{aligned}\quad (5.12)$$

เมื่อ $L^{(k)} = L$ และ $\Omega_l^{(k)} = \Omega_l$ และคุณลักษณะของช่องสัญญาณมีโพไรไฟลความเข้มของสัญญาณหลายเส้นทาง (MIP) ที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล นั่นคือ $\Omega_l = \Omega_0 e^{-l\delta}$ และกำหนดให้

$$q(L, \delta) = \sum_{l=0}^{L-1} e^{-l\delta} = 1 - e^{-L\delta} / 1 - e^{-\delta}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการที่ (5.12) สามารถเขียนได้ใหม่ดังต่อไปนี้

$$\sigma_T^2 = R_c E_b T \Omega_0 \left[\frac{(K-1)q(L,\delta)}{6N} + \frac{q(L,\delta)-1}{4N} + \frac{\eta_0}{4R_c E_b \Omega_0} \right] \sum_{n=0}^{L_r-1} (\beta_n^{(1)})^2 \quad (5.13)$$

- กำลังของสัญญาณที่ต้องการ

จากสมการที่ (5.5) และกำหนดให้ $L_r = L^{(k)} = L$ จะได้ว่า

$$U_s = \sqrt{\frac{R_c E_b T}{2} \sum_{n=0}^{L-1} (\beta_n^{(1)})^2} \quad (5.14)$$

ดังนั้นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่เอาต์พุตของเครื่องรับ แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{U_s^2}{2\sigma_T^2} \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{L-1} (\beta_n^{(1)})^2}{\Omega_0 \left[\frac{2(K-1)q(L,\delta)}{3N} + \frac{q(L,\delta)-1}{N} + \frac{\eta_0}{R_c E_b \Omega_0} \right]} \\ &= \sigma_0 S \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \sigma_0 &= \left[\frac{2(K-1)q(L,\delta)}{3N} + \frac{q(L,\delta)-1}{N} + \frac{\eta_0}{R_c E_b \Omega_0} \right]^{-1} \\ S &= \frac{1}{\Omega_0} \sum_{n=0}^{L-1} (\beta_n^{(1)})^2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ทำการวิเคราะห์

กำหนดให้การเฟดดิ้งในแต่ละสาขาของช่องสัญญาณเป็นอิสระต่อกัน และตัวแปรสุ่มเฟดดิ้งในแต่ละสาขาของช่องสัญญาณมีค่าเท่ากัน จากสมการที่ 5.15 เห็นว่าค่า SNR เป็นฟังก์ชันของผลรวมของกำลังสองของอัตราการลดทอนแอมพลิจูด (β_n) เมื่อ β_n มีการแจกแจงแบบนาคามี ดังนั้นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (pdf) ของ S สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.16)

$$p(S) = \left(\frac{m_T}{\Omega_T} \right)^{m_T} \frac{S^{m_T-1}}{\Gamma(m_T)} \exp\left(-\frac{m_T}{\Omega_T} S \right) \quad (5.16)$$

โดยที่ $m_T = \sum_{l=0}^{L-1} m_l = m_l L$ และ $\Omega_T = \sum_{l=0}^{L-1} \Omega_l = \Omega_0 q(L, \delta)$

สำหรับระบบที่พิจารณาใช้การตีמודูเลตเชิงเลขทางเฟสฐานสองแบบร่วมนัย (coherent detection) ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาด (probability of error) แบบมีเงื่อนไขเมื่อ S เป็นค่าที่แน่นอน [10] แสดงได้ดังสมการ

$$P_e(S) = \frac{\frac{1}{2} \Gamma\left(-, \sigma_0 S\right)}{2\sqrt{\pi}} \quad (5.17)$$

แต่เนื่องจาก S เป็นตัวแปรแบบสุ่มจึงต้องทำการเฉลี่ย $P_e(S)$ ตลอดช่วง pdf ของตัวแปร S ดังนั้นความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตค่าเฉลี่ย (average bit error probability) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{P}_e &= \int_0^{\infty} P_e(S) p(S) dS \\ &= \int_0^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \Gamma\left(-, \sigma_0 S\right) \left(\frac{m_T}{\Omega_T} \right)^{m_T} \frac{S^{m_T-1}}{\Gamma(m_T)} \exp\left(-\frac{m_T}{\Omega_T} S \right) dS \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{1}{\Gamma(m_T)} \left(\frac{m_T}{\Omega_T} \right)^{m_T} \int_0^{\infty} S^{m_T-1} \exp\left(-\frac{m_T}{\Omega_T} S\right) \Gamma\left(\frac{1}{2}, \sigma_0 S\right) dS$$

จาก [11] จะได้

$$\bar{P}_e = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{1}{\Gamma(m_T)} \left(\frac{m_T}{\Omega_T} \right)^{m_T} \left[\frac{\sqrt{\sigma_0} \Gamma\left(m_T + \frac{1}{2}\right)}{2} {}_2F_1\left(1, m_T + \frac{1}{2}; m_T + 1; \frac{m_T}{\sigma_0 \Omega_T + m_T}\right) \right] \quad (5.18)$$

จากสมการที่ (5.18) นำไปใช้ในการหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ไม่ได้ทำการเข้ารหัส โดยค่า SNR ในสมการที่ (5.15) จะไม่มีเทอม R_c ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงไว้ในบทที่ 6

สำหรับระบบที่มีการเข้ารหัส เมื่อสัญญาณมาถึงด้านรับ สัญญาณจะถูกทำการถอดรหัส และเนื่องจากความผิดพลาดของบิตข้อมูลจากช่องสัญญาณเกิดขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นที่บิตข้อมูลเกิดความผิดพลาด (bit error probability) หลังการถอดรหัส [12] ของระบบที่ทำการเข้ารหัส แสดงได้ดังสมการ

$$p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n j \binom{n}{j} \bar{P}_e^j (1 - \bar{P}_e)^{n-j} \quad (5.19)$$

โดยที่ \bar{P}_e คือ ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่เกิดจากช่องสัญญาณ j คือจำนวนบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้น และ n คือจำนวนบิตทั้งหมดในบล็อกรหัส

จากสมการที่ (5.19) นำไปใช้ในการหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ทำการเข้ารหัส โดยผลของการวิเคราะห์ แสดงไว้ในบทที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การหาค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหายและค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย

เนื่องจากบริเวณส่วนหัวของเซลล์ ATM เป็นที่เก็บข้อมูลสำคัญสำหรับการสวิชชิงเซลล์ในเครือข่าย ATM โดยเฉพาะบิตจำนวน 32 บิตแรกที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดเส้นทางการเชื่อมต่อ ชนิดของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในเซลล์ และส่วนควบคุมการไหลของข้อมูล หากมีความผิดพลาดเนื่องจากช่องสัญญาณเกิดขึ้นกับบิตในส่วนหัวนี้ จะทำให้เกิดความเสียหายได้ เช่น เซลล์ถูกส่งไปไม่ถึงจุดหมาย หรือเซลล์ที่ส่งไปมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการเข้ารหัสข้อมูลมาใช้ โดยรหัสที่ใช้คือ รหัสแบบ BCH ซึ่งเป็นการเข้ารหัสที่มีขั้นตอนในการเข้ารหัส การคำนวณซินโดรม และการถอดรหัสที่ทำได้ง่าย มีวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้การเข้ารหัส BCH แบบ (44,32) , (50,32) , (56,32) และ (59,32) ซึ่งรหัสแต่ละแบบสามารถแก้ไขบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการรหัสได้จำนวนเท่ากับ 2, 3 , 4 และ 5 บิตตามลำดับ

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่พิจารณา นอกจากค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดของบิตข้อมูลแล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญสำหรับระบบ ATM ไร้สาย นั่นคือ ค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย (Cell Loss Probability: CLP) ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่อยู่ในส่วนหัวของเซลล์ โดยอุปกรณ์ในเครือข่าย ATM ที่มีความสามารถในการทิ้งเซลล์ที่เกิดความผิดพลาดขึ้น ก็คือ สวิตช์ เพราะสามารถแปลความหมายของบิตข้อมูลที่บรรจุอยู่ในส่วนหัวของเซลล์ได้ แม้ว่าเซลล์ ATM จะมีส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลที่อยู่ในส่วนหัวของเซลล์ ก็คือส่วน HEC แล้วก็ตาม แต่ HEC ก็มีความสามารถแก้ไขบิตผิดได้เพียงบิตเดียว ซึ่งยังไม่เพียงพอสำหรับแก้ไขความผิดพลาดของบิตที่เกิดกับการสื่อสารแบบ ATM ไร้สาย ดังนั้นในการหาค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหายของทั้งระบบที่ไม่ได้เข้ารหัส และระบบที่ทำการเข้ารหัส จึงพิจารณาว่าเซลล์จะสูญหายก็ต่อเมื่อมีความผิดพลาดของบิตเกิดขึ้นมากกว่า 1 บิตหลังจากผ่านการถอดรหัส โดยเริ่มจากการพิจารณาบิตที่ประกอบเป็นส่วนหัวของเซลล์ ซึ่งมีจำนวน 40 บิต ดังนั้นจำนวนบิตออร์หัสที่ประกอบด้วยบิตในส่วนหัวของเซลล์ ATM จึงหาค่าได้จากสมการ

$$b_h = \lfloor 40/k \rfloor \quad (5.20)$$

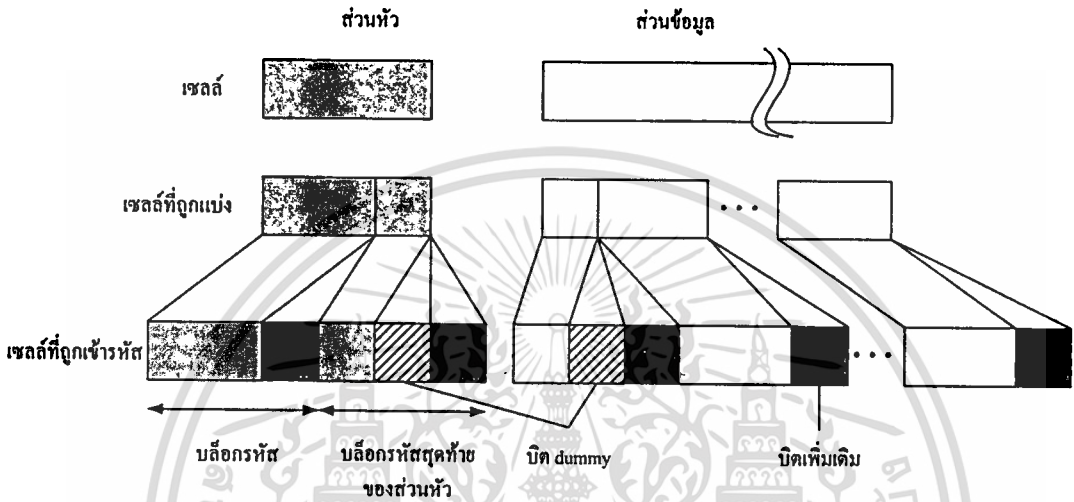
และในบล็อกลสุดท้ายจะมีบิตในส่วนหัวของเซลล์ จำนวนเท่ากับ

$$h_h = 40 - (b_h - 1)k \quad (5.21)$$

ส่วนจำนวนบิต dummy ของบล็อกสุดท้าย หาค่าได้จาก

$$d_h = \text{MIN}(k - h_h, d) \tag{5.22}$$

โดยรูปแสดง โครงสร้างของเซลล์ ATM ที่ถูกเข้ารหัส แสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของเซลล์ ATM ที่ถูกเข้ารหัส

สำหรับการพิจารณาหาค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

- พิจารณาบล็อกรหัสที่มีเฉพาะบิตจากส่วนหัวของเซลล์เพียงอย่างเดียว

เมื่อไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น หมายถึงจำนวนบิตผิดพลาดก่อนทำการถอดรหัสมีค่าน้อยกว่า $t+1$ บิต หรือความผิดพลาดหลังจากการถอดรหัสเกิดขึ้นในบิตเพิ่มเติม ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นหาค่าได้จากสมการ

$$p_0 = \sum_{j=0}^t Bd(j, n, p) + \sum_{j=t+1}^n Bd(j, n, p)(1-r)^{(j-t)} \tag{5.23}$$

โดยที่ p คือความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของบิตก่อนการถอดรหัส

r คืออัตราการเข้ารหัส หาค่าได้จาก $r = k/n$

$Bd(j, n, p)$ คือความน่าจะเป็นที่เกิดบิตผิดพลาดจำนวน j บิต ในจำนวนทั้งหมด n บิต

ด้วยความผิดพลาด (p) หาค่าได้จาก $Bd(j, n, p) = {}_n C_j p^j (1-p)^{(n-j)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความน่าจะเป็นที่เกิดบิตผิดพลาด 1 บิต จากจำนวนบิตผิดพลาดที่สามารถเกิดขึ้นได้ $j+t$ บิต หาค่าได้จากสมการ

$$p_1 = \sum_{j=h}^n C_1 r(1-r)^{(j+h-1)} Bd(j,n,p) \quad (5.24)$$

- พิจารณาบิตออร์หัสที่มีทั้งบิตจากส่วนหัวของเซลล์ และบิต dummy

ความน่าจะเป็นที่ไม่เกิดความผิดพลาดขึ้น โดยไม่นับรวมในบิตเพิ่มเติมและบิต dummy หลังจากทำการถอดรหัสแล้ว แสดงได้ดังสมการ

$$p'_0 = \sum_{j=0}^l Bd(j,n-d_h,p) + \sum_{j=h+1}^{n-d_h} Bd(j,n-d_h,p)(1-r')^j (1-r'')^t \quad (5.25)$$

ส่วนความน่าจะเป็นที่เกิดบิตผิดพลาด 1 บิต แสดงได้ดังสมการ

$$p'_1 = \sum_{j=h+1}^{n-d_h} Bd(j,n-d_h,p) \{ C_1 r' (1-r')^{(j-1)} (1-r'')^t + C_1 (1-r')^j r'' (1-r'')^{(t-1)} \} \quad (5.26)$$

โดยที่ $r' = h_h / (n-d_h)$ และ $r'' = h_h / n$

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราพิจารณาว่าเซลล์จะสูญหาย ก็ต่อเมื่อมีความผิดพลาดของบิตเกิดขึ้นมากกว่า 1 บิต โดยความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดความผิดพลาดขึ้นในส่วนหัวของเซลล์ แสดงได้ดังสมการ

$$h_0 = p_0^{(b_h-1)} p'_0 \quad (5.27)$$

ส่วนค่าความน่าจะเป็นที่เกิดความผิดพลาด 1 บิต ในส่วนหัวของเซลล์ แสดงได้ดังสมการ

$$h_1 = C_1 p_1 p_0^{(b_h-2)} p'_0 + p_0^{(b_h-1)} p'_1 \quad (5.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย เมื่อเกิดความผิดพลาดของบิต สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$L_c = 1 - h_0 - h_1 \quad (5.29)$$

นอกจากค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย ที่เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกสมรรถนะของการเข้ารหัสแล้ว ยังมีพารามิเตอร์อีกอย่างหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญสำหรับระบบเครือข่าย ATM นั่นก็คือ ค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย (Cell Misinsertion Rate: CMR) ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดที่ไม่สามารถตรวจพบได้ (undetected error) หรือเกิดจากความผิดพลาดที่ถูกแก้ไขผิด (miscorrect error) ทำให้ด้านรับไม่สามารถทำการทิ้งเซลล์ที่มีความผิดพลาดนั้นได้ เป็นสาเหตุให้เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย สำหรับค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย [5] สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P_x = 2^{-m} \sum_{i=0}^t C_n^i \sum_{j=i+1}^n C_n^j p^j (1-p)^{(n-j)} \quad (5.30)$$

โดยที่ m คือ บิตเพิ่มเติมของการเข้ารหัส หาค่าได้จาก $m = n - k$
 p คือ ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของบิตก่อนการถอดรหัส

บทที่ 6

ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

สำหรับบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ด้วยการใช้โปรแกรม Matlab เพื่อเลียนแบบการทำงาน โดยที่ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.18) ส่วนค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ทำการเข้ารหัส BCH สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.19) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาผลของตัวแปรเสริมเฟดคิงแบบนาคากามิ จำนวนสาขาของเครื่องรับแบบเรค จำนวนของผู้ใช้งาน และอัตราการเข้ารหัส ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ โดยแบ่งหัวข้อการวิเคราะห์ได้ดังนี้

6.1 ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ

6.1.1 ผลของตัวแปรเสริมเฟดคิงแบบนาคากามิ

6.1.2 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค

6.1.3 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

นอกจากค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตที่สามารถบอกสมรรถนะของระบบได้แล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการบอกสมรรถนะของระบบ ATM ไร้สาย นั่นคือ ค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5.29) และค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายที่ได้จากการคำนวณสมการที่ (5.30) โดยแบ่งหัวข้อการวิเคราะห์ได้ดังนี้

6.2 ค่าความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหาย เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ

6.2.1 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค

6.2.2 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

6.3 ค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ

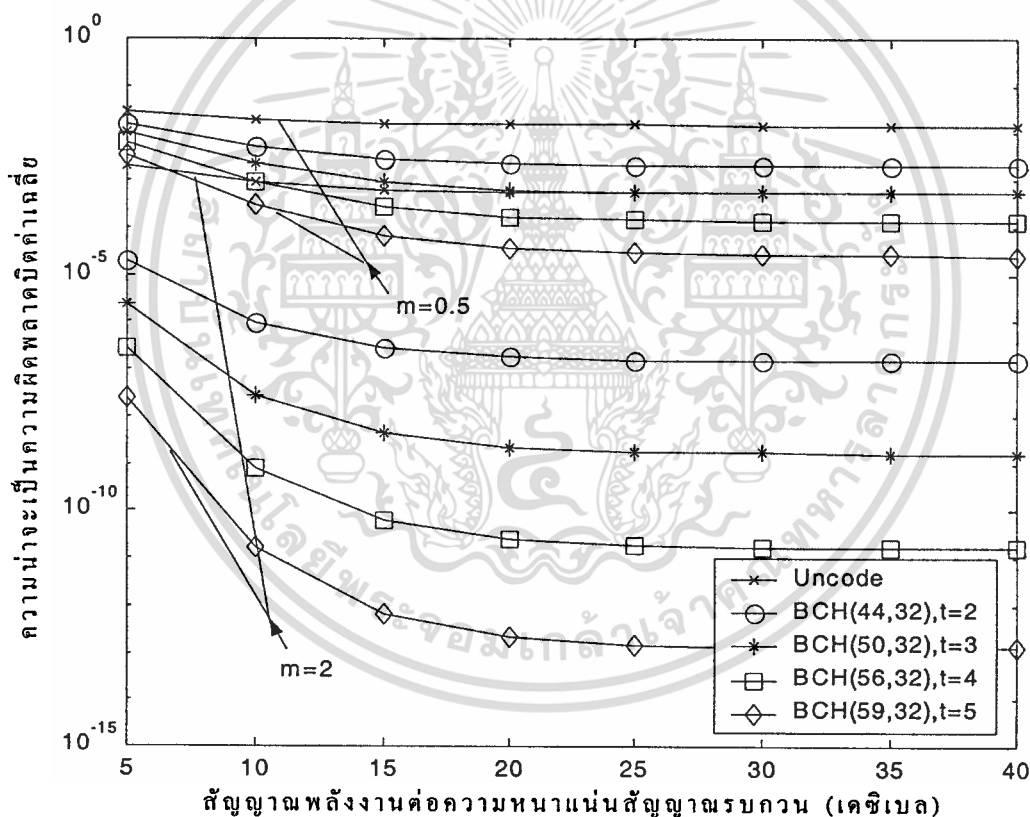
6.3.1 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค

6.3.2 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

6.1 ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ

6.1.1 ผลของตัวแปรเสริมเฟดดิ้งแบบนาคากามิ

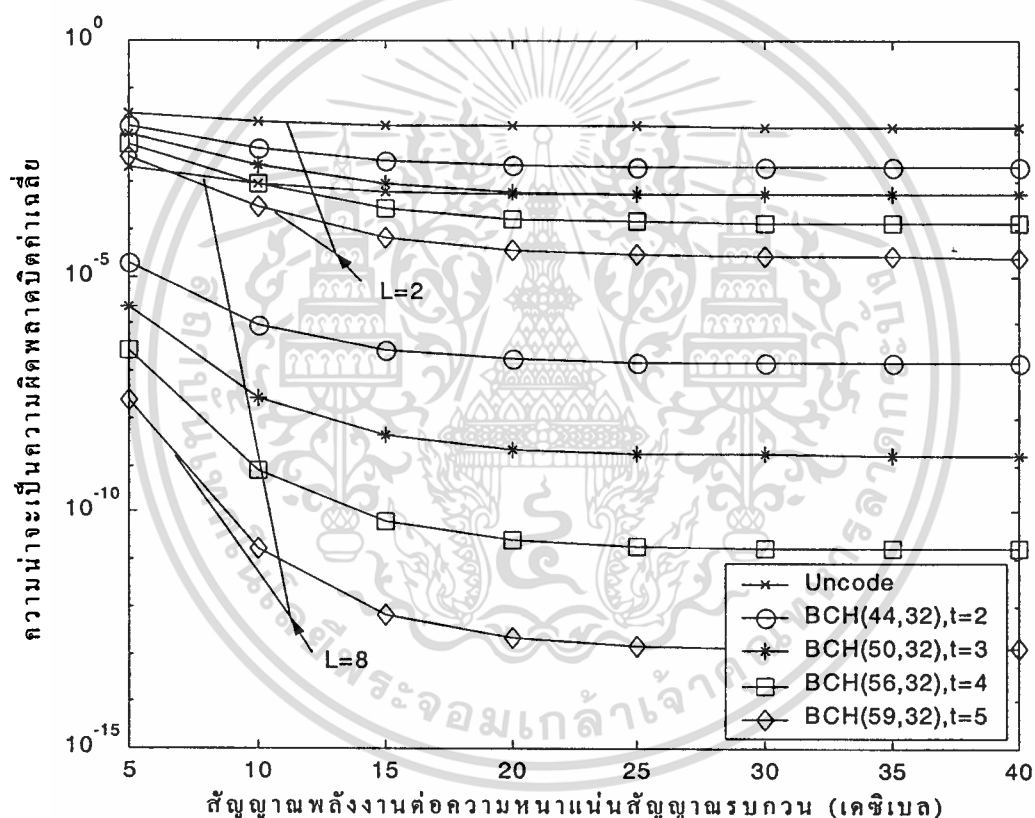
รูปที่ 6.1 แสดงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส ด้วยอัตราการใช้รหัสเท่ากับ 32/44, 32/50, 32/56 และ 32/59 โดยที่จำนวนผู้ใช้งานเท่ากับ 25 ค่าอัตราการใช้รหัสการประมวลผลเท่ากับ 127 อัตราการลทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 และจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 8 เปรียบเทียบเมื่อตัวแปรเสริมเฟดดิ้งแบบนาคากามิ มีค่าเป็น 0.5 และ 2 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรเสริมเฟดดิ้งแบบนาคากามิที่เพิ่มขึ้น และการเข้ารหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดได้มากขึ้น ทำให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบลดลง



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตและสัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25$, $N = 127$, $\delta = 0$, $L = 8$ เปรียบเทียบเมื่อ m มีค่าเป็น 0.5 และ 2

6.1.2 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรด

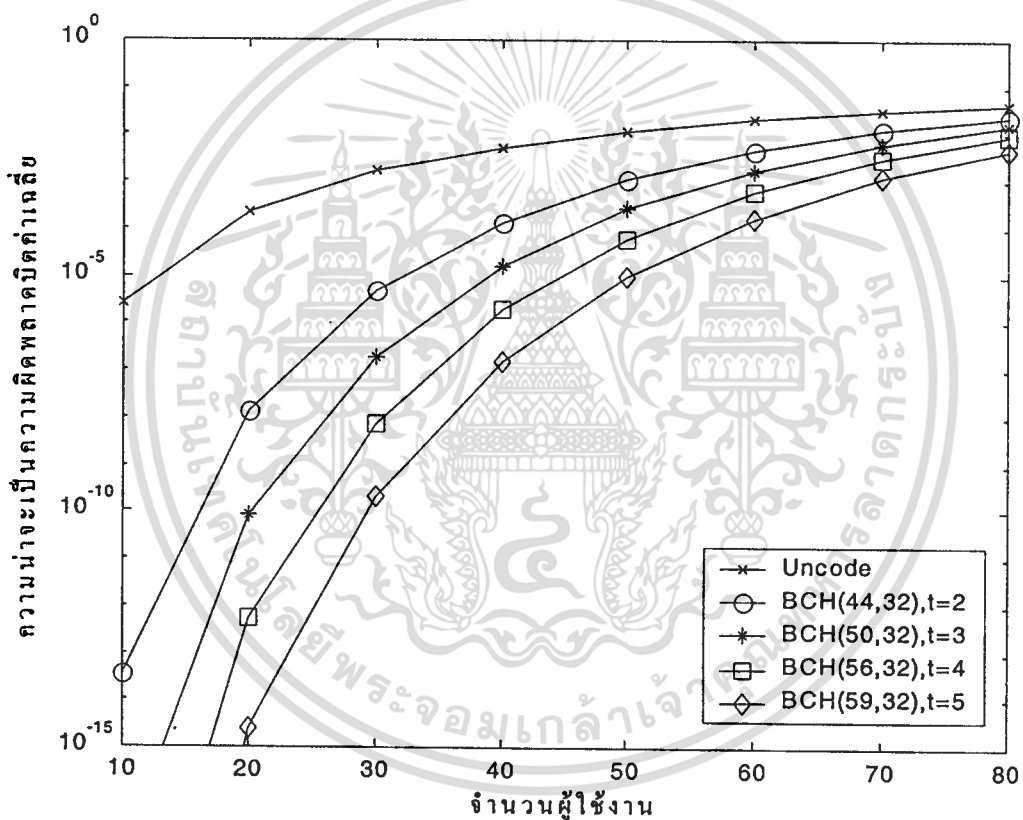
รูปที่ 6.2 แสดงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส ด้วยอัตราการใช้รหัสเท่ากับ 32/44, 32/50, 32/56 และ 32/59 โดยที่จำนวนผู้ใช้งานเท่ากับ 25 ค่าอัตราขยายการประมวลผลเท่ากับ 127 อัตราการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 และตัวแปรเสริมเฟดคิงแบบนาคามีมีค่าเป็น 2 เปรียบเทียบเมื่อจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรดเท่ากับ 2 และ 8 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรดที่เพิ่มขึ้น และการเข้ารหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดได้มากขึ้น ทำให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบลดลง



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตและสัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ เปรียบเทียบเมื่อ L มีค่าเป็น 2 และ 8

6.1.3 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

รูปที่ 6.3 แสดงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส ด้วยอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 32/44, 32/50, 32/56 และ 32/59 โดยที่สัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนใน 1 บิต เท่ากับ 20 ค่าอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 127 อัตราการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 ตัวแปรเสริมเฟดคิงแบบนาคามีมีค่าเป็น 2 และจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 8 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคที่เพิ่มขึ้น และการเข้ารหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดได้มากขึ้น ทำให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบลดลง ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานที่ระบบรองรับได้เพิ่มมากขึ้น

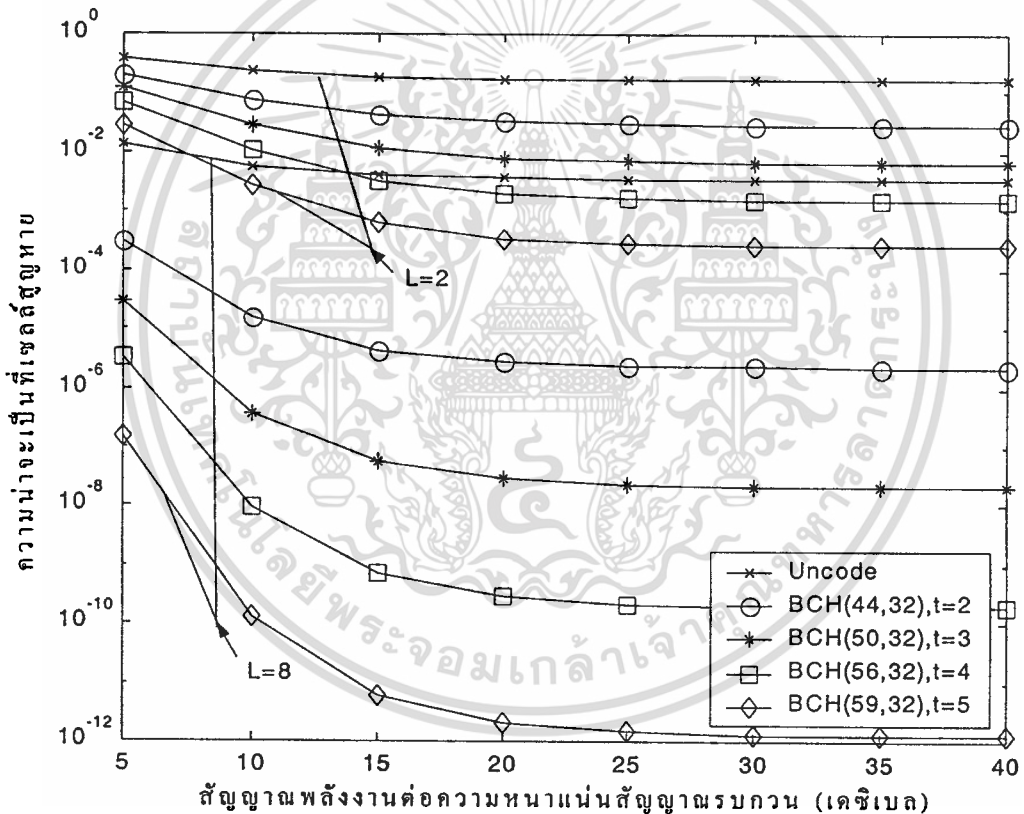


รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตและจำนวนผู้ใช้งานของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $E_b = 20$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ และ $L = 8$

6.2 ค่าความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหาย เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ

6.2.1 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค

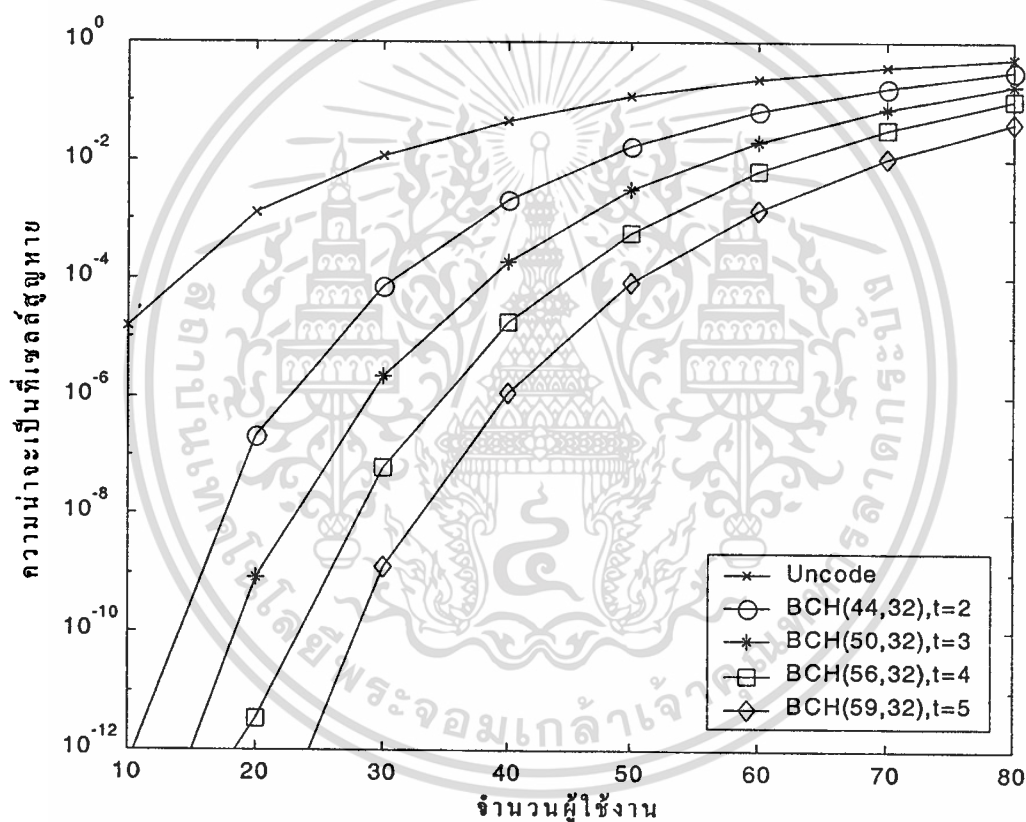
รูปที่ 6.4 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหายของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส ด้วยอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 32/44, 32/50, 32/56 และ 32/59 โดยที่จำนวนผู้ใช้งานเท่ากับ 25 ค่าอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 127 อัตราการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 และตัวแปรเสริมเฟดดิ้งแบบนาคามีมีค่าเป็น 2 เปรียบเทียบเมื่อจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 2 และ 8 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคที่เพิ่มขึ้น และการเข้ารหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดได้มากขึ้น ทำให้ความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหายลดลง



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหายและสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ เปรียบเทียบเมื่อ L มีค่าเป็น 2 และ 8

6.2.2 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

รูปที่ 6.5 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหายของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส ด้วยอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 32/44, 32/50, 32/56 และ 32/59 โดยที่สัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนใน 1 บิต เท่ากับ 20 ค่าอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 127 อัตราการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 ตัวแปรเสริมเฟดคิงแบบนาคากามีมีค่าเป็น 2 และจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 8 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคที่เพิ่มขึ้น และการเข้ารหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดได้มากขึ้น ทำให้ความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหายลดลง ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานที่ระบบรองรับได้เพิ่มมากขึ้น

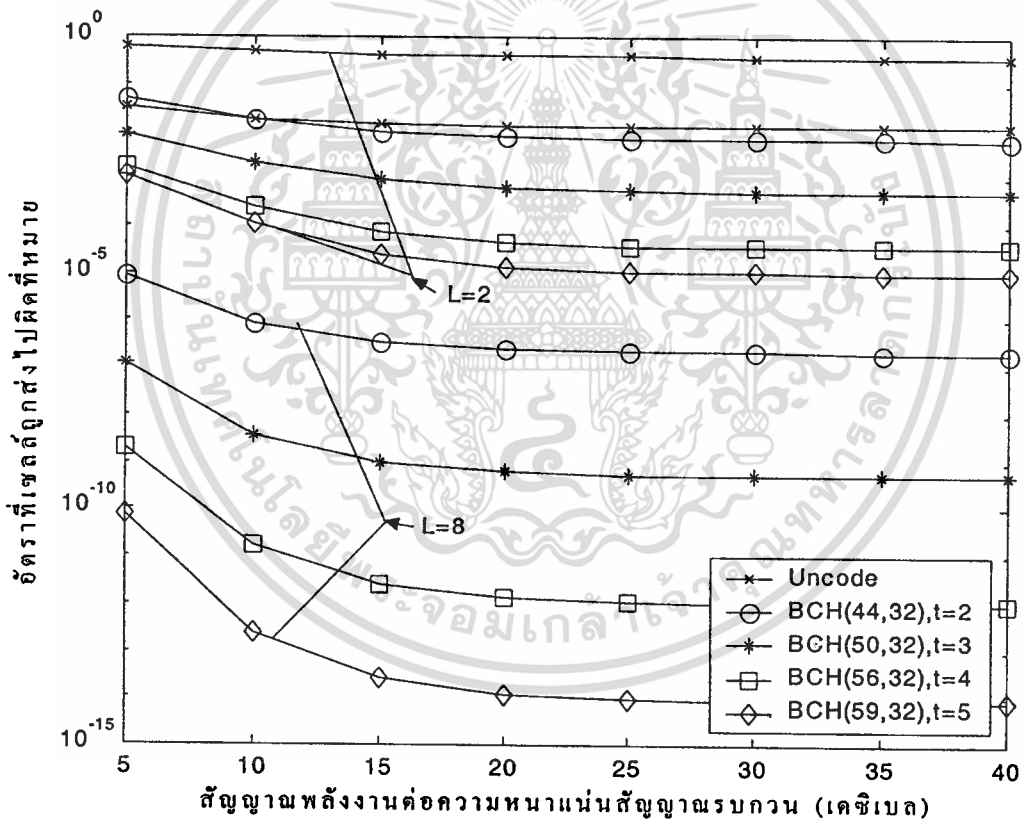


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหายและจำนวนผู้ใช้งานของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัสโดยที่ $E_b = 20$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ และ $L = 8$

6.3 ค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย เมื่อทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ

6.3.1 ผลของจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรค

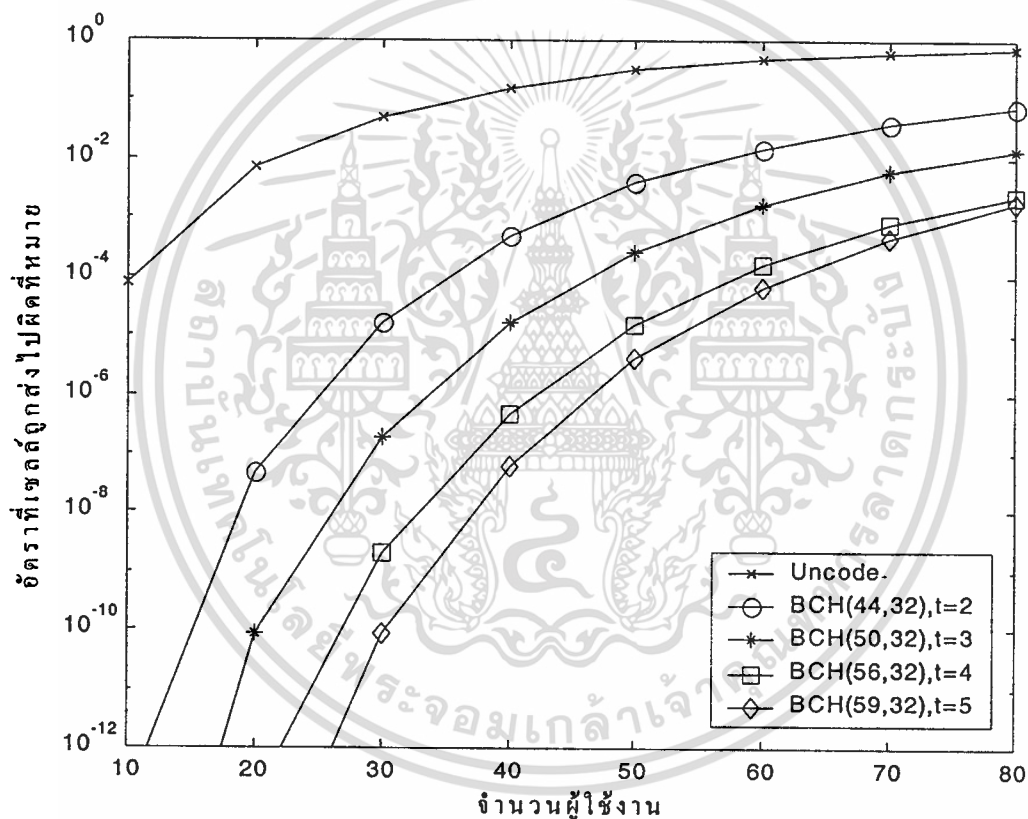
รูปที่ 6.6 แสดงค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส ด้วยอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 32/44, 32/50, 32/56 และ 32/59 โดยที่จำนวนผู้ใช้งานเท่ากับ 25 ค่าอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 127 อัตราการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 และตัวแปรเสริมเฟดคิงแบบนาคามีมีค่าเป็น 2 เปรียบเทียบเมื่อจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคเท่ากับ 2 และ 8 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรคที่เพิ่มขึ้น และการเข้ารหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขผิดพลาดได้มากขึ้น ทำให้อัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายลดลง



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายและสัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส โดยที่ $K = 25$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ เปรียบเทียบเมื่อ L มีค่าเป็น 2 และ 8

6.3.3 ผลของจำนวนผู้ใช้งานในระบบ

รูปที่ 6.7 แสดงค่าอัตราที่เชลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส ด้วยอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 32/44, 32/50, 32/56 และ 32/59 โดยที่สัญญาณพลังงานต่อสัญญาณรบกวนใน 1 บิต เท่ากับ 20 ค่าอัตราการขยายการประมวลผลเท่ากับ 127 อัตราการลดทอนของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 ตัวแปรเสริมเฟดคิงแบบนาคามีมีค่าเป็น 2 เมื่อจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรดเท่ากับ 8 จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจำนวนสาขาเครื่องรับแบบเรดที่เพิ่มขึ้น และการเข้ารหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดพลาดได้มากขึ้น ทำให้อัตราที่เชลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายลดลง ส่งผลให้จำนวนผู้ใช้งานที่ระบบรองรับได้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราที่เชลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายและจำนวนผู้ใช้งานของระบบที่ไม่เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัสโดยที่ $E_b = 20$, $N = 127$, $\delta = 0$, $m = 2$ และ $L = 8$

บทที่ 7

สรุปผลการวิเคราะห์

ระบบการสื่อสาร ATM ไร้สายเป็นระบบที่สามารถรองรับผู้ใช้งานจำนวนมากให้สามารถส่งข้อมูลไปพร้อมกันได้ แต่การสื่อสารไร้สายก็ยังมีข้อจำกัดเรื่องแบนด์วิดท์ช่องสัญญาณ ดังนั้นจึงมีการใช้ระบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส เพราะมีคุณสมบัติในการแยกสัญญาณรบกวนและป้องกันการแทรกสอดของสัญญาณได้ดี ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสด้วยวิธีการจัดลำดับตรง โดยระบบที่ศึกษาจะนำข้อมูลที่ต้องการส่ง มาทำการเข้ารหัสแบบ BCH แล้วจึงนำลำดับข้อมูลที่ได้ออกมาด้วยลำดับรหัส แล้วนำไปมอดูเลตเชิงเลขทางเฟสฐานสอง ก่อนส่งผ่านช่องสัญญาณ ในที่นี้คือช่องสัญญาณแบบนาคาอามิ ด้านรับใช้เครื่องรับแบบแรกที่สามารถชดเชยผลของเฟดดิ้งและทำให้อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูง และใช้การคิมมอดูเลตแบบร่วมนี้ แต่ผลที่ได้พบว่า ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตของระบบยังมีค่าสูง และมีผลกระทบอย่างมากต่อการส่งข้อมูลในเครือข่าย ATM เพราะหากความผิดพลาดของบิตเกิดขึ้นกับข้อมูลที่อยู่ในส่วนหัวของเซลล์ ATM จะทำให้เกิดความเสียหายได้ เนื่องจากบิตที่อยู่ในส่วนหัวของเซลล์นี้ เป็นที่เก็บข้อมูลที่มีความสำคัญสำหรับการส่งเซลล์ไปยังที่หมายปลายทางที่ถูกต้อง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการเข้ารหัสช่องสัญญาณ ด้วยการเข้ารหัสแบบ BCH เพื่อช่วยลดความผิดพลาดของบิตที่เกิดขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ของทั้งระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสและระบบที่เข้ารหัส พบว่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตมีค่าลดลง เมื่อตัวแปรเสริมเฟดดิ้งมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องเมื่อค่าตัวแปรเสริมเฟดดิ้งมีค่าเข้าสู่อันต์คือไม่มีการลดทอนสัญญาณ ทำให้การรับส่งข้อมูลไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น และการเพิ่มจำนวนสาขาเครื่องรับแบบแรกให้มากขึ้น สามารถช่วยลดผลของเฟดดิ้งของสัญญาณ ทำให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตลดลงได้ สำหรับผลการวิเคราะห์ของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัส เปรียบเทียบกับระบบที่เข้ารหัสด้วยอัตราการเข้ารหัสค่าต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนพลังงานสัญญาณต่อความหนาแน่นสัญญาณรบกวนค่าเดียวกัน ระบบที่เข้ารหัสด้วยอัตราการเข้ารหัสที่ลดลง นั่นคือรหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขบิตผิดได้มากขึ้น จะเป็นผลให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตมีค่าลดลง โอกาสที่เซลล์จะสูญหายหรือเดินทางไปไม่ถึงจุดหมายเพราะบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นในส่วนหัวของเซลล์ ATM ทำให้สวิทช์แปลความหมายข้อมูลผิดก็ลดน้อยลงด้วย นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้งานระบบในเวลาเดียวกันจะส่งผลให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผู้ใช้งานที่มากขึ้นจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้งานคนอื่นมากขึ้น แต่ถ้าระบบมีการเข้ารหัสที่มีอัตราการเข้ารหัสลดลง ระบบจะสามารถรองรับผู้ใช้งานได้จำนวนมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chandler D. P., Hulbert A. P., and Mctiffin M. J. "An ATM-CDMA Air Interface for Mobile Personal Communications." IEEE PIMRC 1994.
- [2] Prasad R., Misser H. S., and Kegel A. "Performance Evaluation of Direct-Sequence Spread Spectrum Multiple-Access for Indoor Wireless Communication in a Rician Fading channel." IEEE Trans. Comm., vol. 43, no. 2/3/4, Feb./March/April 1995. pp. 581-591.
- [3] Seki K., Sanada Y., Wang Q., Kato S., and Bhargava V. K. "A Wireless Multimedia Network on a Time Division Duplex CDMA/TDMA." IEICE Trans. Commun., vol. E78-B, no. 7, July 1995. pp.1002-1015.
- [4] Nakayama Y. and Aikawa S. "Cell Discard and TDMA Synchronization Using FEC in Wireless ATM Systems." IEEE J. Select. Areas Commun. vol. 15, no. 1, Jan. 1997. pp. 29-34.
- [5] Aikawa S., Sato H., and Yoshida T. "Performance Analysis of Variable-Rate FEC for Multimedia Radio Communication." IEICE Trans. Commun. vol. E77-B, no. 9, Sep. 1994. pp. 1104-1113.
- [6] Lin S. An Introduction to Error Correcting Codes. New Jersey : Prentice-Hall. 1970.
- [7] Eng T. and Milstein L. B. "Coherent DS-CDMA Performance in Nakagami Multipath Fading." IEEE Trans. Comm. vol. 43, no. 2/3/4, Feb./March/April 1995. pp. 1134-1143.
- [8] Efthymoglou G. and Aalo V. "Performance analysis of coherent DS-CDMA systems in Nakagami Fading Channel with Arbitrary Parameters." IEEE Trans. Vehicular Tech. vol. 46, no. 2, May 1997. pp. 289-297.
- [9] Pursley M. B. "Performance Evaluation for Phase-Coded Spread-Spectrum Multiple-Access Communication-Part I : System Analysis." IEEE Trans. Comm. vol. COM-25, no. 8, Aug. 1977. pp. 795-799.
- [10] Noga K. "The Performance of Binary Transmission in Slow Nakagami-Fading Channels with MRC Diversity." IEEE Trans. Comm. vol. 46, no. 7, July 1998. pp. 863-865.
- [11] Gradshteyn I. S. and Ryzhik I. M. Table of Integrals, Series, and Products. New York : Academic. 1980.
- [12] Proakis J. G. Digital Communications. 4 th ed. Singapore : Mc-Graw Hill. 2000.
- [13] Clark M. P. ATM Networks Principle and Use. Manchester : Wiley-Teubner. 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Onvural R. O. Asynchronous Transfer Mode Networks. London : Artech House. 1995.
- [15] Handel R. et. Al. ATM Networks Concepts, Protocols, Applications. England : Addison-Wesley. 1998.
- [16] Goralski W. J. Introduction to ATM Networking. Singapore : Mc-Graw Hill. 1996.
- [17] Prasad R. CDMA for Wireless Personal Communications. London : Artech. 1996.
- [18] George C. et. al. Error-Correction Coding for Digital Communications. New York : Plenum Press. 1988.
- [19] Michelson A. M. and Leuesque A. H. Error-Control Technique for Digital Communication. Massachusetts. : Wiley-Interscience. 1985.
- [20] Rhee M. Y. Error Corretion Coding Theory. Singapore : Mc-Graw Hill. 1989.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. “การวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัส FEC ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 เดือนมีนาคม 2544 หน้า 74-79.
2. “การวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัสแบบ BCH ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้การเข้าถึงแบบ DS/CDMA บนช่องสัญญาณอากาศามิ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24. กรุงเทพฯ.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัส

```

.....
clear;
m = 0.5;
l = 2;
N = 127;
K = 25;
del = 0;
q = Q(l,del);
Ebdb = [5:5:40];
for i = 1:8
    Eb = 10^(Ebdb(i)/10);
    z(i) = Zigma(K,q,N,Eb);
end
G1 = 1/(2*sqrt(pi));
G2 = (Gamma(m*1))^( -1);
G3 = ((m*1)/q)^(m*1);
for i = 1:8
    G4(i) = ((sqrt(z(i))) * Gamma((m*1)+0.5))/(m*1*(z(i)+((m*1)/q))^(m*1+0.5));
end
for i = 1:8
    G5(i) = Hyper((m*1),0.5,((m*1)/(z(i)*q)+(m*1)));
end
for i = 1:8
    GT0(i) = G1*G2*G3*G4(i)*G5(i);
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการหาความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบที่เข้ารหัส

```

.....
%R=32/44
m = 0.5;
l = 2;
N = 127;
K = 25;
del = 0;
q = Q(l,del);
R = [32/44 32/50 32/56 32/59];
r = R(1);
Ebdb = [5:5:40];
for i = 1:8
    Eb = 10^(Ebdb(i)/10);
    z(i) = Zigma_C(K,q,N,Eb,r);
end
G1 = 1/(2*sqrt(pi));
G2 = (Gamma(m*1))^( -1);
G3 = ((m*1)/q)^(m*1);
for i = 1:8
    G4(i) = ((sqrt(z(i)))*( Gamma((m*1)+0.5)))/(m*1*(z(i)+((m*1)/q)^(m*1)+0.5));
end
for i = 1:8
    G5(i) = Hyper((m*1),0.5,((m*1)/((z(i)*q)+(m*1)));
end
for i = 1:8
    GT1(i) = G1*G2*G3*G4(i)*G5(i);
end
p_eq1 = zeros(1,8);
s = [3:44];
for g = 1:8

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

A(t) = (s(t)).*(binopdf(s(t),44,GT1(g)));
end
sumA(g) = sum(A);
end
p_eq1 = (1/44)*sumA;

.....

semilogy(Ebdb,GT0,'k-x',Ebdb,p_eq1,'k-o',Ebdb,p_eq2,'k-*',Ebdb,p_eq3,'k-s',Ebdb,p_eq4,'k-d');
axis([5 40 1e-5 1e-1])
xlabel('สัญญาณพลังงานต่อความหนาแน่นสัญญาณรบกวน (เดซิเบล) ');
ylabel('ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตค่าเฉลี่ย');
legend('Uncode','BCH(44,32),t=2','BCH(50,32),t=3','BCH(56,32),t=4','BCH(59,32),t=5');

*ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการหาความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหายของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัส*

```

```

.....

m = 0.5;
l = 2;
N = 127;
K = 25;
del = 0;
q = Q(l,del);
Ebdb = [5:5:40];
for i = 1:8
    Eb = 10^(Ebdb(i)/10);
    z(i) = Zigma(K,q,N,Eb);
end
G1 = 1/(2*sqrt(pi));
G2 = (Gamma(m*l))^(-1);
G3 = ((m*l)/q)^(m*l);
for i = 1:8
    G4(i) = ((sqrt(z(i)))*( Gamma((m*l)+0.5)))/(m*l*(z(i)+((m*l)/q))^(m*l+0.5));
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i = 1:8
    G5(i) = Hyper((m*1),0.5,((m*1)/((z(i)*q)+(m*1)));
end
for i = 1:8
    GT0(i) = G1*G2*G3*G4(i)*G5(i);
end
% p00 r=1 1-r=0
p00 = zeros(1,8);
tt0 = [0];
for p = 1:8
    for t = 1:1
        A0(t) = binopdf(tt0(t),32,GT0(p));
    end
    sumA0(p) = sum(A0);
end
jj0 = [1:32];
for p = 1:8
    for j = 1:32
        B0(j) = (binopdf(jj0(j),32,GT0(p))).*((0)^(jj0(j)+0));
    end
    sumB0(p) = sum(B0);
end
p00 = sumA0 + sumB0;
%p10
p10 = zeros(1,8);
for p = 1:8
    for j = 1:32
        D0(j) = ((nchoosek((jj0(j)+0),1)).*(1).*((0)^(jj0(j)+0-1))).*(binopdf(jj0(j),32,GT0(p))));
    end
    sumD0(p) = sum(D0);
end
p10 = sumD0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%p000 1-r''=0.75
p000 = zeros(1,8);
for p = 1:8
    for t = 1:1
        C0(t) = binopdf(tt0(t),14,GT0(p));
    end
    sumC0(p) = sum(C0);
end
kk0 = [1:8];
for p = 1:8
    for k = 1:8
        H0(k) = (binopdf(kk0(k),8,GT0(p))).*(1.*((0.67).^(kk0(k))));
    end
    sumH0(p) = sum(H0);
end
p000 = sumC0 + sumH0;
%p110 %r''=0.25 %1-r''=0.67 %1-r''=0.75 %(1-r'')^0=1
p110 = zeros(1,8);
for p = 1:8
    for k = 1:8
        K0(k) = (binopdf(kk0(k),8,GT0(p))).*((1.*(binopdf(1,kk0(k),0.33)))+(binopdf(1,0,0.25)).*
((0.67).^(kk0(k))));
    end
    sumK0(p) = sum(K0);
end
p110 = sumK0;
%h00 bh=2
h00 = p00.*p000;
%h10
h10 = ((nchoosek(1,1)).*p10.*p000) +(p00.*p110);
%Lc0
Lc0 = 1-h00-h10;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการหาความน่าจะเป็นที่เซลล์สูญหายของระบบที่เข้ารหัส

```

.....
%R=32/44
m = 0.5;
l = 2;
N = 127;
K = 25;
del = 0;
q = Q(l,del);
R = [32/44 32/50 32/56 32/59];
r = R(1);
Ebdb = [5:5:40];
for i = 1:8
    Eb = 10^(Ebdb(i)/10);
    z(i) = Zigma_C(K,q,N,Eb,r);
end
G1 = 1/(2*sqrt(pi));
G2 = (Gamma(m*l))^(-1);
G3 = ((m*l)/q)^(m*l);
for i = 1:8
    G4(i) = ((sqrt(z(i)))*( Gamma((m*l)+0.5)))/(m*l*(z(i)+((m*l)/q)^(m*l)+0.5));
end
for i = 1:8
    G5(i) = Hyper((m*l),0.5,((m*l)/((z(i)*q)+(m*l)));
end
for i = 1:8
    GT1(i) = G1*G2*G3*G4(i)*G5(i);
end
% p01 r=32/44=0.73 1-r=0.27
p01 = zeros(1,8);
tt1 = [0 1 2];
for p = 1:8

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for t = 1:3
    A1(t) = binopdf(tt1(t),44,GT1(p));
end
sumA1(p) = sum(A1);
end
jj1 = [3:44];
for p = 1:8
    for j = 1:42
        B1(j) = (binopdf(jj1(j),44,GT1(p))).*((0.27)^(jj1(j)+2));
    end
    sumB1(p) = sum(B1);
end
p01 = sumA1 + sumB1;
%p11
p11 = zeros(1,8);
for p = 1:8
    for j = 1:42
        D1(j) = ((nchoosek((jj1(j)+2),1)).*(0.73).*((0.27)^(jj1(j)+2-1))).*(binopdf(jj1(j),4,GT1(p))));
    end
    sumD1(p) = sum(D1);
end
p11 = sumD1;
%p001 1-r''=0.82
p001 = zeros(1,8);
for p = 1:8
    for t = 1:3
        C1(t) = binopdf(tt1(t),20,GT1(p));
    end
    sumC1(p) = sum(C1);
end
kk1 = [3:20];
for p = 1:8

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for k = 1:18
    H1(k) = (binopdf(kk1(k),20,GT1(p))).*(0.67.*((0.6).^(kk1(k))));
end
sumH1(p) = sum(H1);
end
p001 = sumC1 + sumH1;
%p111 . %r''=0.18    %1-r''=0.6 %1-r''=0.82 %1-r''^2=0.67
p111 = zeros(1,8);
for p = 1:8
    for k = 1:18
        K1(k) = (binopdf(kk1(k),20,GT1(p))).*((0.67.*(binopdf(1,kk1(k),0.4)))+(binopdf
(1,2,0.18)).*((0.82).^(kk1(k))));
    end
    sumK1(p) = sum(K1);
end
p111 = sumK1;
% h01 bh=2
h01 = p01.*p001;
%h11
h11 = ((nchoosek(1,1)).*p11.*p001)+(p01.*p111);
%Lc1
Lc1 = 1-h01-h11;

semilogy(Ebdb,Lc0,'k-x',Ebdb,Lc1,'k-o',Ebdb,Lc2,'k-*',Ebdb,Lc3,'k-s',Ebdb,Lc4,'k-d');
axis([5 40 1e-10 1e-1])
xlabel('สัญญาณพลังงานต่อความหนาแน่นสัญญาณรบกวน (เดซิเบล)');
ylabel('ความน่าจะเป็นที่เชลล์สูญหาย');
legend('Uncode','BCH(44,32),t=2','BCH(50,32),t=3','BCH(56,32),t=4','BCH(59,32),t=5');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผิดที่หมายของระบบที่ไม่ได้เข้ารหัส

```

.....
m = 0.5;
l = 2;
N = 127;
K = 25;
del = 0;
q = Q(l,del);
Ebdb = [5:5:40];
for i = 1:8
    Eb = 10^(Ebdb(i)/10);
    z(i) = Zigma(K,q,N,Eb);
end
G1 = 1/(2*sqrt(pi));
G2 = (Gamma(m*1))^(-1);
G3 = ((m*1)/q)^(m*1);
for i = 1:8
    G4(i) = ((sqrt(z(i)))*( Gamma((m*1)+0.5)))/(m*1*(z(i)+((m*1)/q)^(m*1)+0.5));
end
for i = 1:8
    G5(i) = Hyper((m*1),0.5,((m*1)/((z(i)*q)+(m*1)));
end
for i = 1:8
    GT0(i) = G1*G2*G3*G4(i)*G5(i);
end
jj0 = [1:32];
ii0 = [0];
for p0 = 1:8
    for k0 = 1:31
        B0(k0) =binopdf(jj0(k0),32,GT0(p0));
    end
    sumB0(p0) = sum(B0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end
for i0 = 1:1
    U0(i0) = nchoosek(32,ii0(i0));
end
sumU0 = sum(U0);
P0 =(2^0)*sumU0.*sumB0;

```

ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าอัตราที่เซลล์ถูกส่งไปผลิตที่หมายของระบบที่เข้ารหัส

```

.....
%R=32/44
m = 0.5;
l = 2;
N = 127;
K = 25;
del = 0;
q = Q(l,del);
R = [32/44 32/50 32/56 32/59];
r = R(1);
Ebdb = [5:5:40];
for i = 1:8
    Eb = 10^(Ebdb(i)/10);
    z(i) = Zigma_C(K,q,N,Eb,r);
end
G1 = 1/(2*sqrt(pi));
G2 = (Gamma(m*1))^(-1);
G3 = ((m*1)/q)^(m*1);
for i = 1:8
    G4(i) = ((sqrt(z(i)))*( Gamma((m*1)+0.5)))/(m*1*(z(i)+((m*1)/q))^(m*1+0.5));
end
for i = 1:8
    G5(i) = Hyper((m*1),0.5,((m*1)/(z(i)*q)+(m*1)));
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i = 1:8
    GT1(i) = G1*G2*G3*G4(i)*G5(i);
end
jj1 = [3:44];
ii1 = [0 1 2];
for p1 = 1:8
    for k1 = 1:42
        B1(k1) = binopdf(jj1(k1),44,GT1(p1));
    end
    sumB1(p1) = sum(B1);
end
for i1 = 1:3
    U1(i1) = nchoosek(44,ii1(i1));
end
sumU1 = sum(U1);
P1 = (2^-12)*sumU1.*sumB1;

semilogy(Ebdb,P0,'k-x',Ebdb,P1,'k-o',Ebdb,P2,'k-*',Ebdb,P3,'k-s',Ebdb,P4,'k-d');
axis([5 40 1e-10 1e-1])
xlabel('สัญญาณพลังงานต่อความหนาแน่นสัญญาณรบกวน (เดซิเบล)');
ylabel('ค่าอัตราที่เชลล์ถูกส่งไปผิดที่หมาย');
legend('Uncode','BCH(44,32),t=2','BCH(50,32),t=3','BCH(56,32),t=4','BCH(59,32),t=5');

```

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริกานต์ ชูเชิด เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2518 ที่จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540 ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ คือ 1. “การวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัส FEC ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้การเข้าถึงแบบ CDMA” วิศวกรรมลาดกระบังปีที่ 18 ฉบับที่ 1 เดือนมีนาคม 2544. และ 2. “การวิเคราะห์สมรรถนะของการเข้ารหัสแบบ BCH ในระบบ ATM ไร้สายที่ใช้การเข้าถึงแบบ DS/CDMA บนช่องสัญญาณอากาศ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24. กรุงเทพฯ.

