สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบ GSM

GSM Simulator : Air Interface

นาย คเชนทร์ กรรณิกา รหัส 43015859

นาย ไทยรัฐ เสกแปลก รหัส 43015864

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....46544
วัน, เดือน, ปี.....4 เม.ย. 2546

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GSM Simulator : Air Interface

Mr.Kachan Kannika ID. 43015859

Mr.Thairath Sekplaek ID. 43015864

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMET OF

THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY IN TELECOMUNICATION

DETARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING

FACULITY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2002

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โปรแกรมจำลองการทำงานระบบ GSM		
นักศึกษา	นาย คเชนทร์	กรรณิกา	รหัส 43015859
	นาย ไทยรัฐ	เสกแปลก	รหัส 43015864
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	อ. มนต์ชัย	แช่มช้อย	
	อ. พนารัตน์	ระวิวรรณ	
	อ. อรรถสิทธิ์	หล่าสกุล	
ระดับการศึกษา	ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต		
	สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม		
ภาควิชา	เทคนิคอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2545		

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้นับปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

.....

(อ. มนต์ชัย แช่มช้อย)

.....

(อ. พนารัตน์ ระวิวรรณ)

.....

(อ. อรรถสิทธิ์ หล่าสกุล)

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โปรแกรมจำลองการทำงานระบบ GSM		
นักศึกษา	นาย คเชนทร์	กรรณิกา	รหัส 43015859
	นาย ไทยรัฐ	เสกแปลก	รหัส 43015864
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	อ. มนต์ชัย	แช่มช้อย	
	อ. พนารัตน์	ระวิวรรณ	
	อ. อรรถสิทธิ์	หล่าสกุล	
ระดับการศึกษา	ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต		
	สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม		
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2545		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน GSM 05.03,05.04 และ 05.05 ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำงานตั้งแต่ การเข้ารหัสช่องสัญญาณ การทำอินเตอร์ลีฟ การมัลติเพล็ก การมอดูเลชั่น และการส่งผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งในที่นี้จะเป็นการศึกษาเฉพาะการส่งสัญญาณเบสแบนด์เท่านั้น เพื่อดูผลกระทบของสัญญาณที่ทางด้านรับ โดยจะทำการจำลองการทำงานด้วย Graphic User Interface (GUI) ของโปรแกรม Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THESIS TITLE	**GSM SIMULATOR : AIR INTERFACE**
STUDENT	Mr.Kachan Kannika ID. 43015859
	Mr.Thairath Sekplaek ID. 43015864
ADVISOR	Mr.Monchai Chamchoy
	Miss.Panarat Rawiwan
	Asst.Prof.Dr. Attasit Lasakul
COURSE	Bachelor of Industrial Technology in Telecomunication
DEPARTMENT	Information Engineering
YEAR	2002

ABSTRACT

This thesis present process of GSM celluiar system with simulate by reference GSM 05.03, 05.04 and 05.05 standard. A step simulation since Channel coding, Interleving, Multiplexing, Modulation and Channel tranfered. Thus thesis present baseband signal only. With study after-effect of signal to received . In thesis Simulator by Graphic User Interface (GUI) of Matlab Program.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์และโครงงานนี้จากท่าน อ.มนต์ชัย แช่มช้อย และ อ. พนารัตน์ ระวิวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ และอาจารย์ทุก ๆ ท่านในภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณท่าน ผศ.ดร. อรรถสิทธิ์ หล่าสกุล ที่ได้ให้อนุญาตเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำโครงงานและปริญญานิพนธ์ และ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์ ที่ให้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ และพี่ ป.โท ทุกคนสำหรับคำแนะนำ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ รวมทั้งให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์นี้ขึ้นมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ หลวงตา ยาย และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่เป็นผู้ให้สิ่งที่ดีเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ โอกาสนี้

คเชนทร์ กรรณิกา

ไทยรัฐ เสกแปลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
หัวข้อปริญญานิพนธ์ (ภาษาไทย)	I
หัวข้อปริญญานิพนธ์ (ภาษาอังกฤษ)	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 แนวความคิดและที่มา	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 พื้นฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM	3
2.1 ข้อมูลทั่วไปของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM	3
2.2 การเข้ารหัส (Encoding)	10
2.3 อินเตอร์ลีฟวิง (Interleaving)	14
2.4 การมัลติเพล็ก (Multiplexing)	14
2.5 การมอดูเลทแบบจีเอ็มเอสเค (GMSK Modulation)	16
2.6 อีควอไลเซอร์ (Equalizer)	18
บทที่ 3 การออกแบบ	26
3.1 ภาคส่ง (Transmister)	26
3.1.1 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding)	27
3.1.2 อินเตอร์ลีฟวิง (Interleaving)	32
3.1.3 Burst Multiplexing	36
3.1.4 การมอดูเลทแบบจีเอ็มเอสเค (GMSK Modulation)	37
3.2 ช่องสัญญาณ (Channel)	42
3.3 ภาครับ (Receive)	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การใช้โปรแกรม GUI ของการ Simulate และ การทดลอง 53

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 61

ภาคผนวก

บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 บล็อกไดอะแกรมการ Simulate	2
2.1 ส่วนประกอบโครงข่ายระบบ GSM	7
2.2 โครงสร้างของ Frame Superframe และ Hyperframe	8
2.3 โครงสร้างของ Burst	9
2.4 บล็อกไดอะแกรมการเข้ารหัสสัญญาณเสียง	10
2.5 การแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 class	11
2.6 การจัดข้อมูลเข้าเบริสท์ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM	15
2.7 โครงสร้างของ Normal Burst	16
2.8 ผลกระทบของการเกิด ISI	17
2.9 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน	17
2.10 สเปกตรัมของการมอดูเลทแบบ GMSK	18
2.11 การแบ่งชนิดของอีควอไลเซอร์	20
2.12 โครงสร้างของวงจรอีควอไลเซอร์	21
3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Simulate	26
3.2 โครงสร้างของการเข้ารหัส Cyclic code	28
3.3 โครงสร้างของการดข้ารหัส Convolution code	30
3.4 Trellis diagram ของการเข้ารหัส convolution	33
3.5 โครงสร้างของ Normal Burst	36
3.6 การจัดข้อมูลเข้าเบริสท์ของโปรแกรม func_burst.m	37
3.7 ขั้นตอนการมอดูเลทแบบ GMSK	38
3.8 การส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ (Channel)	42
3.9 Tapped delay line :TDL หรือ Finite Impulse Response : FIR	42
3.10 การทำงานของภาครับ	46
3.11 ตัวอย่างการถอดรหัส Convolution code โดยใช้ Trellis diagram	49
3.12 การทำงานของการส่งข้อมูลมากกว่า 260 บิต	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 ลักษณะของโปรแกรม Matlab	53
4.2 หน้าแรกของโปรแกรมจำลองการทำงาน	54
4.3 หน้าจอของ Basic block mode	54
4.4 กราฟข้อมูลอินพุตและบิตข้อมูล 260 บิต	55
4.5 กราฟของข้อมูลที่ส่งและรับได้ของบิตข้อมูลในเบริสท์ที่ 1 ของ Channel ที่เป็น AWGN เมื่อ SNR = 100 dB	56
4.6 สัญญาณเบสแบนด์ I และ Q ของข้อมูลในเบริสท์ที่ 2	57
4.7 กราฟและข้อมูลการผิดของบิตของ AWGN เมื่อเปลี่ยน SNR = 0 dB	57
4.8 ผลของ BER เมื่อใช้ช่องสัญญาณ TUx เมื่อ fc = 900 MHz , fs = 1 MHz , v = 100 Km/Hr , SNR = 30 dB	58
4.9 ผลของ BER เมื่อใช้ช่องสัญญาณ TUx เมื่อ fc = 900 MHz , fs = 10 MHz , v = 100 Km/Hr , SNR = 30 dB	59
4-10 ผลของข้อมูลใน Class 1a เมื่อใช้ช่องสัญญาณ AWGN ที่ SNR = 30 dB	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ข้อกำหนดของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM	4
3-1 ตารางการเปลี่ยนสถานะ (state table) ของการเข้ารหัส Convolution	32
3-2 การทำอินเตอร์ลีฟวิง (full rate)	35
3-3 Training Sequence Code	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์

สำหรับโครงงาน (Project) นี้เป็นโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม (GSM) ที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาหลักการทำงานระหว่างการรับและการส่งสัญญาณระหว่างเครื่องลูกข่าย (Moblic station:MS) โดยจะจำลองการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding), การมัลติเพล็ค (Multiplex), การมอดูเลชั่นแบบจีเอ็มเอสเค (GMSK Modulation) วิธีการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณในแบบต่าง ๆ และการถอดรหัสช่องสัญญาณ (Channel decoding) เพื่อนำเอาข้อมูลเดิมกลับคืนมา ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM โดยสามารถแสดงขั้นตอนการส่งสัญญาณผ่านหน้าจอ Computer ด้วยการใช้โปรแกรม Matlab

1.2 แนวความคิดและที่มา

เนื่องจากการที่ได้ศึกษาการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ซึ่งทำให้ทราบว่ามีการทำงานและส่งสัญญาณที่ซับซ้อนมากยากแก่การที่จะศึกษาให้เข้าใจในทางทฤษฎีเพียงอย่างเดียว จึงคิดว่าน่าจะนำทฤษฎีที่ศึกษากันอยู่มาทำการจำลองระบบการทำงานของการส่งสัญญาณของแต่ละส่วน เพื่อที่จะได้มองเห็นภาพการทำงานชัดเจนและเข้าใจมากยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

สำหรับในโครงงานนี้จะเป็นจำลองการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ซึ่งขั้นตอนการทำงานที่จะทำการ Simulate จะเริ่มตั้งแต่การเข้ารหัสช่องสัญญาณซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต่อจากกระบวนการเข้ารหัสสัญญาณเสียง (Speech Coding) โดยข้อมูลที่นำมาเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นจะเป็นข้อมูลดิจิตอลที่ผ่านการเข้ารหัสสัญญาณเสียงแล้วซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะทำการสุ่มตัวอย่าง (Random) ขึ้นมา จากนั้นก็จะนำไปผ่านกระบวนการทำงานต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.1

Channel Coding : การเข้ารหัสข้อมูลข่าวสารเพื่อป้องกันการสูญหายของข้อมูล ตามมาตรฐาน GSM 05.03 การเข้ารหัสที่ใช้คือ การเข้ารหัสแบบ cyclic และคอนโวลูชั่น (convolution code) รวมทั้งการทำ Interleave เพื่อแก้ปัญหาการผิดพลาดของข้อมูลแบบเบริสท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

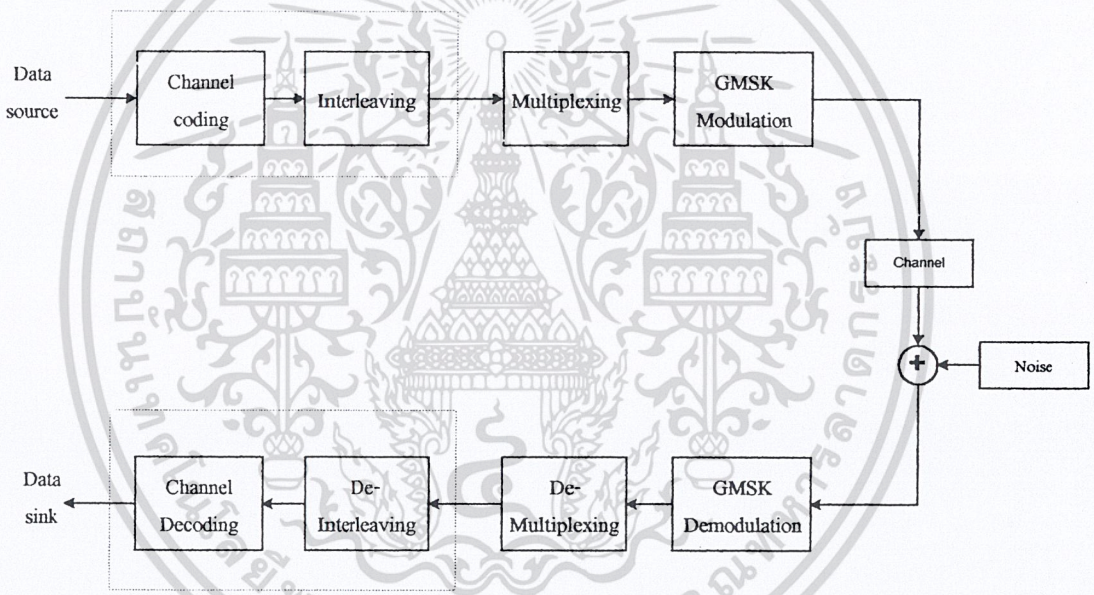
Multiplex : การสร้าง Burst ของข้อมูลตามมาตรฐานของระบบ GSM ก่อนที่จะส่งไป Modulated ตามมาตรฐาน GSM 05.02

GMSK Modulation : การมอดดูเลทข้อมูลข่าวสารแบบ GMSK ตามมาตรฐาน GSM 05.04 สำหรับในโครงงานนี้จะทำการส่งสัญญาณที่เป็นเบสแบนด์เท่านั้น

GMSK Demodulation : การดีมอดดูเลทข้อมูลข่าวสารแบบ GMSK

Demultiplex : การแยกข้อมูลข่าวสารออกจาก Burst แต่ละ Burst เพื่อที่จะนำไปถอดรหัสข้อมูลข่าวสาร

Channel Decoding : การถอดรหัสข้อมูลข่าวสารเดิมกลับมาและการ De-inteleave ข้อมูล



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมการ Simulate

1.4 ผลที่คาดว่าได้รับ

ได้ทำความเข้าใจกับการทำงานของระบบสื่อสารมากขึ้นและสามารถใช้โปรแกรมทำการ Simulate การทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ในส่วนของการเชื่อมต่อทางอากาศ (Air Interface) โดยจะจำลองแต่ละส่วนดังนี้

- การเข้ารหัสและถอดรหัสของ Channel Coding รวมถึงการทำ Interleaving
- การ Multiplex และ Demultiplex
- การ Modulation และ Demodulation ของสัญญาณแบบ GMSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
พื้นฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM

ในการทำโครงงาน (Project) นี้จะเป็นการศึกษาการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.1 โดยจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเข้าการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding) ซึ่งเป็นกระบวนการการป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลที่อาจจะเกิดขึ้นได้สูงในการส่งสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ และจะรวมไปถึงการทำอินเตอร์ลีฟวิง (Interleaving) ที่จะนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาในเรื่องของการผิดพลาดแบบเบริสต์, การมัลติเพล็ก (Multiplex), การมอดูเลทสัญญาณที่ใช้การมอดูเลทแบบจีเอ็มเอสเค (GMSK Modulation), และวิธีการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ (Channel) ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อดูผลกระทบของสัญญาณที่เกิดขึ้นระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตที่ได้

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1.1 ข้อมูลอินพุต (Data source) ที่จะนำไปเข้ากระบวนการเข้ารหัสช่องสัญญาณและกระบวนการต่อ ๆ ไปนั้น จะเป็นเสียงพูดที่ผ่านกระบวนการเข้ารหัสสัญญาณเสียง (speech coding) ตามมาตรฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ซึ่งรายละเอียดของการทำงานแต่ละส่วนจะอธิบายรายละเอียดต่อไป

2.1 ข้อมูลทั่วไปของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM

เพื่อที่จะให้ทราบถึงลักษณะของการนำเสนอโครงงาน (Project) "GSM Simulator : Air Interface" จะขออธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ให้พอสังเขปดังนี้

2.1.1 Global System For Mobile Communication :GSM

โทรศัพท์ระบบ GSM เดิมย่อมาจากคำว่า Group Special Mobile เป็นระบบโทรศัพท์แบบไร้สายที่มีการพัฒนาเข้าสู่ยุค 2G (Second Generation) โดยเกิดจากการรวมตัวกันของประเทศยุโรปหลายประเทศภายใต้การดูแลของกลุ่ม CEPT (Conference Of European Post And Telegraphs) ในปี 1982 จุดประสงค์ในการพัฒนา เพื่อ

- ให้ได้คุณภาพเสียงที่ดีขึ้นกว่าเดิม
- การให้บริการและตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่มีราคาต่ำลง
- รองรับการใช้บริการและสิ่งอำนวยความสะดวกใหม่ ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สนับสนุนการใช้งานร่วมกันระหว่างประเทศได้ (Inter Roaming)
- ให้โทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถใช้ร่วมกับโครงข่ายโทรศัพท์ระบบ PSTN (Public Switched Telephone Network) ได้ดีและสามารถให้ใช้ร่วมกับโครงข่ายระบบ ISDN (Integrated Service Digital Network) ได้โดยตรงในอนาคต
- ใช้แถบความถี่ที่มีอยู่จำกัดอย่างมีประสิทธิภาพสามารถเพิ่มช่องสัญญาณในการให้บริการ และรองรับผู้ใช้บริการได้มากขึ้น
- ให้สามารถจัดระบบการป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากระบบ Digital สามารถจัดระบบป้องกันการดักฟัง และการลักลอบใช้งานได้ดีกว่าระบบ Analog

2.1.2 ข้อกำหนดต่างของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM (GSM Specification) จะมีรายละเอียดดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM

มาตรฐาน	รายละเอียดทางเทคนิค
Access Method	TDMA / FDMA
Frequency Band (MS To BS)	890 – 915 MHz
Frequency Band (BS To MS)	935 – 960 MHz
Duplex Distance	45 MHz
Channel Bandwidth	200 KHz
Modulation	GMSK
Bit Rate	270.833 Kbps
Filter	BT = 0.3 (Gaussian)
Voice Channel Coding	RPE-LPC Convolutional 13 Kbps
Frequency Hopping	Slow Hopping (217 Hops/Sec)
Frame Interval	8 Timeslots = 4.615 ms
Timeslot	0.577 ms
Interleaving	40 ms
Associated Control Channel	Extra Frame
Hand Off Method	MAHO
User Per Channel	8
BS Power Level	2,5,5,10,20,40,80,160,320 Watts
Number Of Channels	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โครงสร้างของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM (Architecture of the GSM system) จะมีโครงสร้างดังในรูปที่ 2.1

1) เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Station : MS) จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดต่อกันมีส่วนประกอบสองส่วนคือ ME (Mobile Equipment) และ SIM Card (Subscriber Identity Module)

2) สถานีฐาน (Base Station Subsystem : BSS) จะเป็นส่วนที่ติดต่อกับ MS โดยการต่อร่วมทางอากาศ (Air Interface) ซึ่งจะประกอบด้วย

- Base Station Controller (BSC) ทำหน้าที่จัดการความถี่วิทยุ (Radio resource) ของ BTS หนึ่งตัวหรือหลายๆ ตัวพร้อมทั้งยังทำหน้าที่ ควบคุมการ Setup Radio-Channel, Frequency Hopping,การทำ Hand Over ซึ่งตัว BSC นี้จะติดต่อระหว่างตัวเครื่องโทรศัพท์ กับ MSC (Mobile Service Switching Center) นอกจากนั้นยังทำหน้าที่แปลง Voice Channel ที่ Bit rate 13 Kbps ให้ใช้ได้กับ Standard PSTN และ ISDN ที่ Bit rate 64 Kbps อีกด้วย
- Base Transceiver Station (BTS) ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับเครื่องโทรศัพท์ (MS) ทั้งหลายที่อยู่ภายใน Cell ต่างๆ โดย BTS หนึ่งตัวจะทำหน้าที่ให้บริการครอบคลุมพื้นที่บริเวณ หนึ่ง Cell ซึ่งตัว BTS นั้นจะทำงานคล้ายๆกับส่วน ME ของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MS) โดย BTS จะถูกควบคุมโดย BSC อีกที่หนึ่งเช่นการทำ Hand Over และการควบคุมกำลังส่ง

3) Network Subsystem :NSS เป็นส่วนประกอบของระบบที่ควบคุมการทำงานเช่น การเชื่อมโยงระหว่างระบบ (Network Interworking) การจัดการข้อมูลของผู้ใช้และควบคุมการให้บริการ (Subscriber Data and Service Handing) และควบคุมการเรียก (Call control) รวมถึงการทำงานของ BSS เป็นต้น ซึ่ง NSS ประกอบด้วย

- Home Location Register (HLR) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลต่างๆ ของผู้ใช้บริการในการขอใช้บริการใหม่ในครั้งแรก โดยจะจัดเก็บรายละเอียดประเภทการให้บริการ หมายเลขประจำตัวผู้ใช้บริการและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการตรวจสอบความถูกต้องในการขอเข้าใช้บริการ รวมทั้งจัดเก็บข้อมูลสถานะของเครื่องการเปิด-ปิดเครื่อง การโทรออก รับสายเข้าและพื้นที่การใช้งานครั้งหลังสุด ข้อมูลต่างๆเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงเมื่อตัว MS เคลื่อนที่ไปยังอีก MSC หนึ่งโดยตัว MS จะส่งข้อมูลตำแหน่งที่มันอยู่ ผ่าน MSC และ VLR เพื่อนำไปเก็บไว้ใน HLR โดยข้อมูลบางส่วนจะถูกเก็บไว้ใน VLR ด้วย
- Visitor Location Register (VLR) เป็นฐานข้อมูลที่อยู่คู่กับ MSC ในการจัดเก็บข้อมูลชั่วคราวของเครื่องโทรศัพท์ (MS) ที่อยู่ใน MSC นั้นซึ่งมันจะทำการจัดเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสาร... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง...

เกี่ยวกับตำแหน่งของตัวเครื่องโทรศัพท์ (MS) ในทันทีเมื่อเคลื่อนที่เข้ามายังพื้นที่ MSC ใหม่โดยตัว VLR ที่ต่ออยู่กับ MSC ตัวใหม่ จะทำการขอข้อมูลของตัวเครื่องโทรศัพท์ (MS) นั้นจาก HLR มาเก็บไว้เมื่อมีการโทรออก หรือรับสายเข้า VLR ก็จะมีข้อมูลพร้อมสำหรับการ Call Set-up โดยไม่จำเป็นต้องขอข้อมูลจาก HLR ทุกครั้งไป

- Authentication Center (AUC) และ EIR (Equipment Identity Register) เป็นฐานข้อมูลที่เก็บข้อมูลที่เป็นความลับเกี่ยวกับความปลอดภัยของระบบโดยระบบจะทำการลงทะเบียนหมายเลขประจำตัวของผู้ใช้บริการ IMSI (International Mobile Subscriber Identity) และรหัสลับ Ki ซึ่งตัวเครื่องโทรศัพท์ (MS) แต่ละตัวจะมีหมายเลข IMSI ที่เปรียบเสมือนเลขประจำตัวของมันเองระบบจะทำการตรวจสอบว่าสามารถเข้าใช้ระบบได้หรือไม่จากหมายเลข IMSI และรหัส Ki ที่ได้ลงทะเบียนไว้กับระบบแล้ว

4) ระบบปฏิบัติการ OSS (Operating and Support Subsystem) ระบบปฏิบัติการนี้ประกอบด้วย OMC (Operating And Maintenance Center) มีหน้าที่ในการดูแลจัดการการปฏิบัติการของระบบโดยรวม เช่น การจัดการกับส่วนที่เสียหาย ของระบบ การปรับตั้งค่าต่างๆ ของระบบให้เหมาะสม การจัดการเรื่องของสมาชิกผู้ใช้บริการ รวมถึงการ ทำ Billing เพื่อเรียกเก็บค่าใช้บริการ ซึ่ง OMC จะต้องติดต่อกับ HLR ด้วย

2.1.4 การส่งสัญญาณวิทยุในระบบ GSM (Radio Link Aspect)

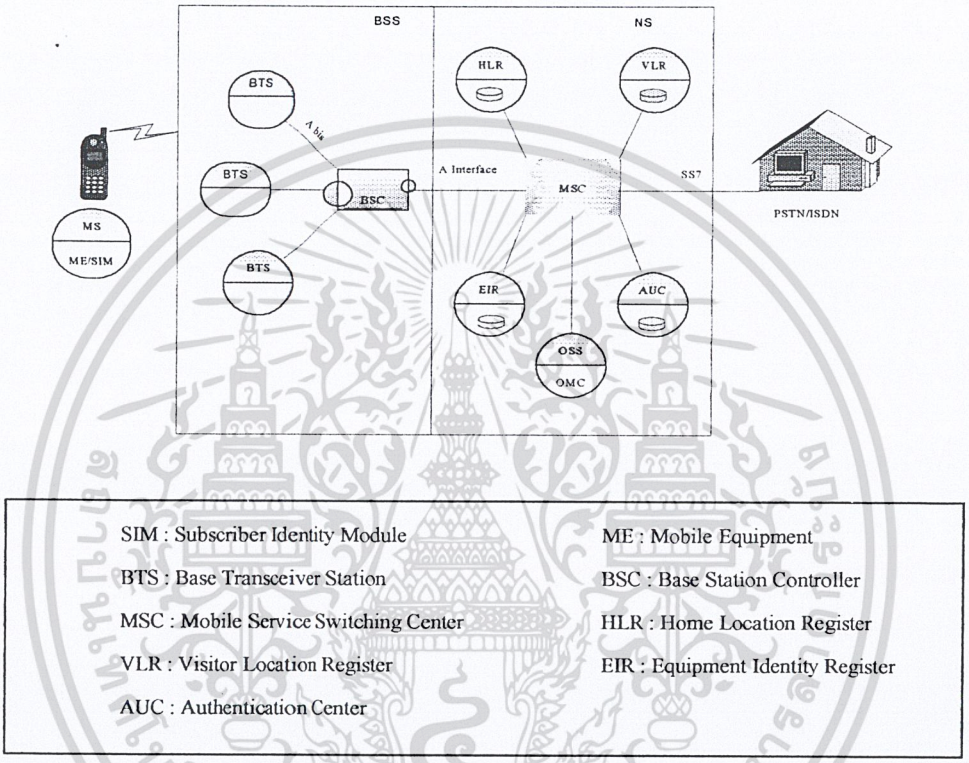
สำหรับการแบ่งความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM จะใช้การแบ่งความถี่แบบ FDMA (Frequency Diversion Multiple Access) ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณจะมีความถี่ห่างกัน 200 KHz และในแต่ละช่องสัญญาณสามารถแบ่งจังหวะ Timing การใช้งานออกอีกเป็น 8 ไทม์สล็อต โดยการแบ่งแบบ TDMA (Time Division Multiple Access)

2.1.5 โครงสร้างเฟรมในระบบ GSM (Frame Structure)

ในการส่งสัญญาณออกอากาศของระบบ GSM นั้นหลังจากการแปลงสัญญาณเสียงที่เป็นสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณดิจิตอล (A/D) แล้วข้อมูลของสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็น Block ทุก 20 ms ส่งผ่านกระบวนการ Coding , Mutiplexing และ Modulating เพื่อในภาคส่งจะทำการส่งสัญญาณในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องกัน เหตุผลเพื่อทำให้ได้คุณภาพเสียงที่ดีขึ้น ลดการสิ้นเปลืองกำลังส่งของภาคส่งรวมทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอีกด้วยซึ่งการส่งสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง สำหรับโครงสร้างของ Frame (Frame Structure) ในการส่งสัญญาณในระบบ GSM นั้นจะใช้คลื่นพาห์ที่มีความกว้างของ Bandwidth เท่ากับ 200 KHz ข้อมูลจะถูกส่งด้วยอัตราเร็ว 270.833 Kbps โดยข้อมูลจะถูกส่งออกเป็น TDMA Frame แต่ละ TDMA Frame จะมีความยาว 4.62 ms หรือเท่ากับ 8 ไทม์สล็อต ซึ่งใน 1 ไทม์สล็อต นั้นจะยาวเท่ากับ 577 us สามารถส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา

ข้อมูลได้ 156.25 bits หรือเรียกว่า 1 เบริสต์ เมื่อนำข้อมูล 1 TDMA Frame มารวมกันจำนวน 26 Frame



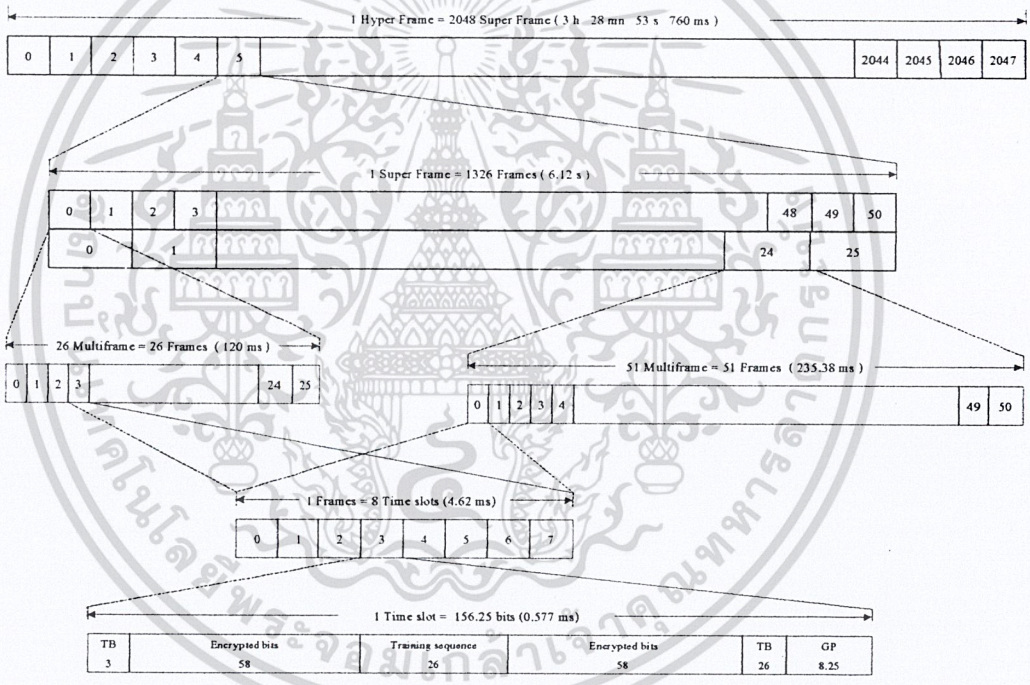
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบโครงข่ายระบบ GSM

หรือ 51 Frame จะได้เป็น Multiframe สำหรับ 26 Frame-Multiframe (26 TDMA Frame) หรือเท่ากับ 120 ms ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลแบบ TCH (Traffic Channel) 24 Frame ใช้ในการส่งสัญญาณเสียงและสัญญาณข้อมูลส่วนที่เหลืออีก 2 Frame คือ Frame ที่ 12 และ 25 แต่ละ Frame ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SACCH/T (Slow Associated Control Channel) และ FACCH ที่ใช้ในการส่ง Signalling ต่าง ๆ เช่น สัญญาณในการตรวจเช็ค Signaling Strength , Time Alignment, การเลือก Up/Down Link และอื่นๆ โดยใน Frame ที่ 25 จะเป็น Idle/FACCH ใช้ในกรณีของ Half Rate TCH นอกจากนั้นโครงสร้างของ Frame อีกแบบ คือ 51 Frame-Multi frame ซึ่งมี Time duration = 235.4 ms Multiframe นี้ใช้ในการส่งสัญญาณชนิด BCCH , CCCH และ SDCCH หรือ PBCH กับ PCCCH Supper Frame ได้จากการนำ 26 Frame-Multiframe มารวมกันจำนวน 51 Multiframe และ ก็นำ 51 Frame-Multiframe มารวมกันจำนวน 26 Multiframe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้ Time Duration เท่ากับ 6.12 s และถ้าเอา Supper Frame มารวมกัน 2047 Frame จะได้เป็นหนึ่ง Hyper Frame ซึ่งโครงสร้างของ Hyper Frame และ Supper Frame สามารถดูรายละเอียดได้ดังรูปที่ 2.2

โครงสร้าง Time slot และ Burst (Time slot and Burst Structure) ในการแบ่งช่วงเวลาใน TDMA Frame นั้นตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถแบ่งช่วงเวลาในการ รับ-ส่ง สัญญาณออกเป็น 8 Time slot ซึ่งแต่ละไทม์สล็อต นี้จะมีช่วงเวลา เท่ากับ 577 us เมื่อมองในทางโครงสร้างแล้วมันก็คือเบริสท์นั่นเอง ซึ่ง Burst ในระบบ GSM สามารถแบ่งออกตามการใช้งานได้ 4 ชนิด ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ Frame Supperframe และ Hyperframe

- Normal Burst จะใช้ในการส่งข้อมูลเสียงใน Traffic Channel (TCH) และ Control Channel(CCH) ยกเว้น RACH , PRACM , และ CPRACH ซึ่งประกอบไปด้วย 116 encrypted bitsTraining Sequence 26 bits และ Tail บิตปิดหัวท้ายอีกข้างละ 3 บิต นอกจากนี้ยังมี Guard time ต่อท้ายอีก 8.25 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Frequency Correction Burst (FB) จะใช้สำหรับช่วยให้ตัว Mobile สามารถ Synchronize ความถี่พาหะ
- Synchronization Burst ใช้สำหรับการ Synchronization ของช่วงเวลาในการ รับ-ส่งสัญญาณ ของเครื่อง Mobile ซึ่งจะประกอบด้วย Training Sequence ที่ยาว 64 bits และ ข้อมูลของ TDMA ที่เป็น Frame number (FN) พร้อมทั้ง Base Station Identity Code (BSIC) การส่งจะส่งสัญญาณในลักษณะ Broadcast ติดต่อกันโดยจะส่งรวมไปกับ Frequency correction Busrt ซึ่งในการส่งสัญญาณแบบนี้เรียกว่า SCH (Synchronization channel)
- Access Burst (AB) จะใช้สำหรับการที่เครื่อง Mobile เริ่มเปิดใช้งานครั้งแรก (หรือก่อน การทำ hand over) โดยที่เครื่อง Mobile ยังไม่รู้จังหวะในการส่งและรับสัญญาณที่ถูกต้อง (เครื่องเริ่มทำการ Synchronization) ซึ่งจะสังเกตได้จากใน Burst นี้จะมี Guard time 68.25 bits ซึ่งยาวกว่าเบริสท์อื่น ๆ เพื่อให้กว้างพอที่เครื่อง Mobile ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานมาก ๆ (ในที่นี้ให้มีระยะทาง 35 km) ส่งสัญญาณ Burst นี้ไปเพราะอาจจะเกิดการซ้อนทับกันของไทม์สล็อตในเครื่องที่อยู่ใกล้สถานีกว่ามาก ๆ ในเบริสท์นี้จะส่งสัญญาณใน (P) RACH และ CPRACH

1 Time slot=156.25 bits (.577ms)(1 Symbol=3.69us)

TB	Encrypted bits	Training sequence	Encrypted bits	TB	GP
3	58	26	58	3	8.25

Normal Burst

TB	Fixed bits	TB	GP
3	142	3	8.25

Frequency Correction Burst

TB	Encrypted bits	Synchronization sequence	Encrypted bits	TB	GP
3	39	64	39	3	8.25

Synchronization Burst

TB	Synchronization sequence	Encrypted bits	TB	GP
8	64	36	3	68.25

Access Burst

TB = Tail bit GP = Guard period

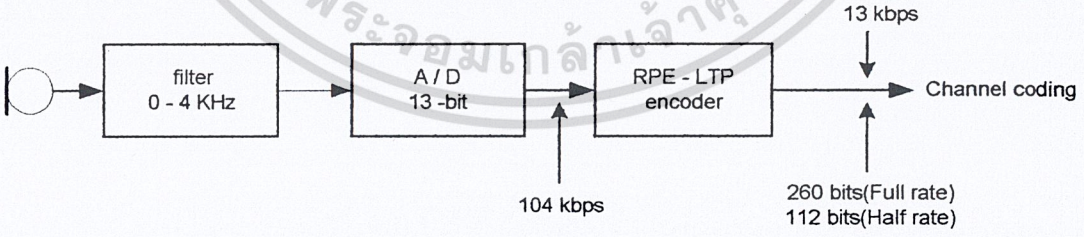
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Burst

2.2 การเข้ารหัส (Encoding)

2.2.1 การเข้ารหัสสัญญาณเสียง (Speech coding) ก่อนที่จะทำการเข้ารหัสช่องสัญญาณจะต้องนำสัญญาณเสียงพูดซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณ อนาล็อกไปเข้ารหัสสัญญาณเสียง (Speech coding) ให้เป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอล (Digital signal) ก่อนซึ่งจะมีลักษณะการทำงานดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 เมื่อเสียงพูดซึ่งปกติจะอยู่ช่วงความถี่ 300 – 3400 KHz จะผ่านวงจรกรองความถี่โดยจะจำกัดแบนด์วิดธ์ (bandwidth) ให้อยู่ในช่วงความถี่ 0 – 4 KHz เท่านั้น จากนั้นจะทำการสุ่มสัญญาณ (sampling) ด้วยความถี่ 2 เท่าของสัญญาณเสียงคือ 8000 Hz (2 x 4 KHz) คือจะทำการสุ่มค่าทุกๆ 125 ไมโครวินาที (μsec) แล้วแทนค่าสัญญาณที่ได้ด้วยข้อมูลดิจิตอลขนาด 13 บิต (2^{13} = 8,192 ระดับ) ดังนั้นอัตราเร็วการส่งข้อมูลของวงจรแซมปลิ้งสัญญาณจะเท่ากับ 8,000 x 13 = 104,000 บิตต่อวินาที (104 kbps) และจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 160 ชุด จากนั้นข้อมูลทั้ง 160 ชุด ที่ได้จะนำไปเข้ารหัสสัญญาณเสียงเพื่อลดอัตราเร็วของการส่งข้อมูล (bit rate) ลง ซึ่งตามมาตรฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM จะใช้การเข้ารหัสสัญญาณเสียงแบบ Regular Pulse Excitation – Long Term Prediction (RPE – LTP) เป็นการเข้ารหัสสัญญาณเสียงประเภท Hybrid coders ที่เป็นการนำเอาข้อดีของการเข้ารหัส 2 แบบเข้าด้วยกันซึ่งก็คือ RPE-LPC (Regular Pulse Excitation –Linear Predictive Coding) ที่พัฒนาโดยบริษัท Philips ประเทศเยอรมันนีที่มีข้อดีคือให้คุณภาพของสัญญาณเสียงที่ดีและวงจรเข้ารหัสไม่ซับซ้อนมากนัก แต่จะมีสัญญาณรบกวนถ้ามีการผิดพลาดของบิตข้อมูล



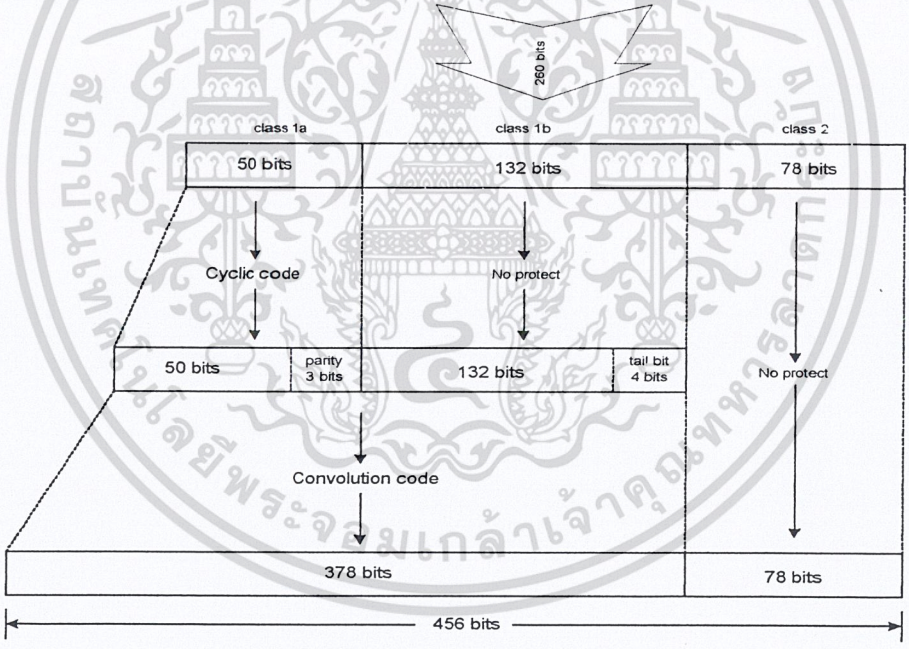
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมการเข้ารหัสสัญญาณเสียงพูด (Voice coder)

และอีกแบบหนึ่งคือ MPE-LTP (Multi Pulse Excitation-Long Term Prediction) ที่พัฒนาโดยบริษัท IBM ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งให้คุณภาพของเสียงที่ดีมากและสามารถทำงานได้ดีในแม้ในขณะที่มีการผิดพลาดของข้อมูล แต่วงจรเข้ารหัสจะมีความซับซ้อนมาก เมื่อผ่านกระบวนการเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสสัญญาณเสียงแบบ RPE-LTP แล้วจะได้ข้อมูลออกมา 260 บิต ในทุก ๆ ช่วงเวลา 20 ms และอัตราเร็วของการส่งข้อมูลจะเป็น 13 kbps (260 bit / 20 ms = 13 kbps) สำหรับการสื่อสารแบบ Full rate (112 บิตสำหรับ Half rate)

ต่อจากนั้นข้อมูลดิจิตอลขนาด 260 บิตจะนำไปเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding) ได้ข้อมูลเอาท์พุตขนาด 456 บิต ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบ Full rate นั้นจะแบ่งข้อมูลดิจิตอล 260 บิตออกเป็น 3 class ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ได้แก่ class 1a มีข้อมูล 50 บิต และจะนำไปเข้ารหัสแบบ cyclic โดยเติมบิตพาริตี้ (parity check bit) เข้าไป 3 บิต, class 1b มีข้อมูล 132 บิต และเติม tail bits เข้าไป 4 บิต แล้วนำเอาข้อมูล 189 บิต (50+3+132+4 = 189) ไปเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution coding) ได้ข้อมูล 378 บิต, และ class 2 จะมีข้อมูล 78 บิตซึ่งไม่มีการเข้ารหัสป้องกัน ดังนั้นข้อมูลของเอาท์พุตของการเข้ารหัสช่องสัญญาณจะเท่ากับ 378 + 78 = 456 บิต



รูปที่ 2.5 การแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 class

จากรูปที่ 2.5 จะได้บิตข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 456 บิต ส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูล (bit rate) เพิ่มขึ้นเป็น 22.8 kbps (456 bits / 20 ms = 22.8 kbps) แล้วจะนำบิตข้อมูลเหล่านี้ไปทำการอินเตอร์ลีฟวิง และกระบวนการขั้นต่อ ๆ อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channal Coding)

การเข้ารหัสช่องสัญญาณมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอัตราการผิดพลาดของการส่งข้อมูล ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่จะทำการเพิ่มบิตพิเศษรวมเข้าไปกับข้อมูลที่จะส่งไป เพื่อให้ทางด้านรับสามารถที่จะทำการตรวจจับการผิด (error detection) ของบิตข้อมูลที่เกิดการผิดพลาดขึ้นในระหว่างการส่งผ่านช่องสัญญาณเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นได้ หรือทำการแก้ไขการผิด (error correction) ของบิตข้อมูลที่ตรวจจับการผิดได้ถ้าหากบิตที่เพิ่มเข้าไปมีจำนวนมากพอ จะเห็นว่าการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นจะเป็นการเพิ่มอัตราการส่งให้มากขึ้นนั่นหมายถึงแบนด์วิดธ์ของช่องสัญญาณก็จะต้องกว้างมากขึ้น แต่ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นจะมีแบนด์วิดธ์ที่จำกัดจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดอัตราการส่งของข้อมูลลงแต่ต้องคำนึงถึงคุณภาพและความถูกต้องของสัญญาณที่รับได้ด้วย

การเข้ารหัสช่องสัญญาณสามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ

1) Forward Error Correction (FEC) การแก้ไขการผิดล่วงหน้า เป็นลักษณะการเข้ารหัสที่ทางด้านรับจะต้องสามารถตรวจจับว่ามีบิตผิดพลาดเกิดขึ้นในระหว่างการส่งผ่านช่องสัญญาณหรือไม่ และอาจจะต้องสามารถระบุได้ด้วยว่าเกิดการผิดพลาดขึ้นที่บิตใดแล้วภาครับจะทำการแก้ไขการผิดนั้นให้ถูกต้องเอง

2) Error Detection & Retransmission การตรวจจับการผิดและการส่งสัญญาณเดิมกลับมาใหม่ เป็นการเข้ารหัสที่ทางด้านรับจะสามารถทำการตรวจจับว่ามีการผิดพลาดที่เกิดขึ้นหรือไม่เท่านั้น ถ้าหากพบว่ามีการผิดก็จะส่งสัญญาณกลับไปยังภาคส่งเพื่อขอให้ส่งสัญญาณเดิมกลับมาให้ใหม่ซึ่งการเข้ารหัสนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Automatic repeat request(ARQ)

สำหรับการเลือกลักษณะการเข้ารหัสของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นจะใช้วิธีการของ FEC จะไม่ใช้การเข้ารหัสแบบ Error detection & transmission เนื่องจากว่าสัญญาณเสียงพูดนั้นจะต้องมีความต่อเนื่องไม่มีการประวิง (delay) มากเกินที่กำหนด ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่าก็ตาม การเข้ารหัสแบบ Error detection &transmission จะเหมาะสมกับการสื่อสารประเภทข้อมูลที่เป็นคาต้ามากกว่า การเข้ารหัสช่องสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ คือ

- การเข้ารหัสแบบบล็อก (Block coding)

การเข้ารหัสแบบบล็อกนั้นจะเป็นการเข้ารหัสที่ทำการแบ่งบิตของข้อมูลที่จะเข้ารหัสออกเป็นกลุ่มหรือบล็อกขนาด k บิต เมื่อนำไปเข้ารหัสแล้วจะได้ข้อมูลที่เรียกว่า คำรหัส (codeword) ที่มีขนาด n บิต โดยที่ $n > k$ ซึ่งในคำรหัสนั้นจะประกอบด้วยข้อมูลเดิมและเพิ่มบิตตรวจสอบ (parity check bit : r) ที่มีขนาดเท่า $n - k$ บิต ($r = n-k$) บิตตรวจสอบที่เติมเข้าไปนั้นจะใช้สำหรับตรวจสอบการผิดของบิตข้อมูลที่เกิดขึ้นในระหว่างการส่งผ่านช่องสัญญาณว่ามีการผิด (error) หรือไม่ การเข้ารหัสแบบบล็อกนั้นเรียกอีกอย่างว่า (n,k) สำหรับการเข้ารหัสแบบบล็อกนั้นจะมีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา

หลายชนิด เช่น Linear block code, cyclic code, BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem code) เป็นต้น

สำหรับในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM จะมีการเข้ารหัสถึง 2 ชั้น ดังในรูปที่ 2-5 ซึ่งจะเข้ารหัสแบบ cyclic ของข้อมูลใน class 1a ซึ่งมีข้อมูล 50 บิตก่อนเมื่อเข้ารหัสแล้วจะได้ข้อมูลออกมา 53 บิต

การเข้ารหัสแบบ Cyclic code เป็นรหัสที่ใช้ตรวจสอบการผิดที่ใช้กันมาก เนื่องจากสามารถตรวจจับการผิดได้ดีและตรวจจับได้มากกว่า 1 บิต โดยจะทำการเติมบิตเพิ่มเข้าไปเพื่อให้ภาครับสามารถตรวจจับการผิดได้ บิตที่เติมเข้าไปนั้นเรียกว่าบิตส่วนเกิน (Redundancy) ของข้อมูลที่จะส่งไปจากภาคส่ง ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดนั้นจะอาศัยการหารแบบมอดูโล 2 เพื่อหาเศษของข้อมูล จะเรียกการตรวจจับความผิดของข้อมูลในลักษณะนี้ว่า Cyclic Redundancy Code (CRC) โครงสร้างของการเข้ารหัสจะประกอบชิฟท์รีจิสเตอร์ (shift register) ซึ่งมีจำนวนของชิฟท์รีจิสเตอร์จะเท่ากับกำลังสูงสุดของโพลีโนเมียลกำเนิด (polynomail generator) และข้อมูลของเอาท์พุตจากการเข้ารหัส cyclic จะมีขนาด n บิต ประกอบด้วยข้อมูลอินพุตขนาด k บิต รวมบิตตรวจสอบขนาด n – k บิต (บิตตรวจสอบนี้ได้จากการหารแบบมอดูโล 2 แล้วเอาเฉพาะเศษ)

ความสามารถในการตรวจจับความผิดของการเข้ารหัส CRC สามารถกระทำได้หลายรูปแบบ แต่ความถูกต้องนั้นอาจจะไม่ 100% เสมอไป เพราะอาจมีกรณีที่บางบิตผิดไปแต่ได้ผลหารที่ลงตัวก็เป็นได้

ในการเข้ารหัส CRC ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM นั้นจะเป็นการให้ภาครับรับรู้ว่ามีการผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่เท่านั้นจะไม่มีการให้ภาครับแก้ไขการผิดพลาด (error correction) นั้น

- การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชั่น (convolution coding)

การเข้ารหัสคอนโวลูชันนั้นจะเป็นการเพิ่มบิตส่วนเกินเข้าไปเพื่อใช้ในการถอดรหัสของภาครับซึ่งมีความสามารถตรวจจับและแก้ไขการผิดของบิตเช่นเดียวกับรหัสบล็อก แต่โครงสร้างของการเข้ารหัสจะซับซ้อนมากกว่า และในการเข้ารหัสจะนำบิตของข้อมูลในช่วงเวลาก่อนหน้า (t-1) มามีส่วนในการเข้ารหัสด้วย สำหรับในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM จะใช้อัตราการเข้ารหัส (code rate : R = k/n) ที่ 1 / 2 โดย k คือจำนวนบิตอินพุตที่จะเข้ารหัส ส่วน n คือจำนวนบิตข้อมูลเอาท์พุตที่ได้จากการเข้ารหัสและใช้ค่า constraint length : K = 5 โดยในการเข้ารหัสจะนำข้อมูลจากการเข้ารหัส Cyclic จำนวน 53 บิต รวมกับข้อมูลในคลาส 1b 132 บิตและทำการเติม tail bit 4 บิตรวมเป็นข้อมูล 189 บิต เมื่อเข้ารหัสคอนโวลูชันแล้วจะได้ข้อมูลเอาท์พุตขนาด 378 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสคอนโวลูชั่น 378 บิต รวมกับข้อมูลในคลาส 2 อีก ซึ่งไม่มีการเข้ารหัสอีก 78 บิต จะได้ข้อมูลทั้งหมด 456 บิต ส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 22.8 kbps

2.3 อินเตอร์ลีฟวิง (Interleaving)

การทำอินเตอร์ลีฟวิงเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการผิดพลาดของข้อมูลแบบเบริสต์ (burst error) ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งเนื่องจากสัญญาณแทรกสอด (interference) และสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งการเข้ารหัสช่องสัญญาณที่เป็นการเพิ่มบิตให้มากขึ้นการแก้ไขบิตที่ผิดจะสามารถทำได้ดีเมื่อมีการผิดพลาดของข้อมูลในลักษณะที่เกิดขึ้นแบบการกระจายกันออกไป แต่จะทำได้ไม่ดีเมื่อมีการเกิดการผิดแบบเบริสต์

หลักการของการทำอินเตอร์ลีฟก็คือจะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นบล็อก ๆ ที่มีขนาดแถวคูณคอลัมน์ และจะสลับตำแหน่งของข้อมูลกันออกไปยังแต่ละบล็อก ส่วนทางด้านรับก็จะทำการเอาข้อมูลกลับตำแหน่งเดิมด้วยกระบวนที่สลับกันกับภาคส่ง ซึ่งข้อมูลที่รับได้ถ้ามีการผิดพลวดเกิดขึ้นตำแหน่งที่ผิดนั้นจะกระจายกันไป ดังนั้นระบบสามารถที่จะแก้ไขการผิดพลาดหรือกู้ข้อมูลที่ถูกต้องกลับมาได้ง่ายกว่า และไม่ต้องใช้การเข้ารหัสที่มีความสามารถสูงมากนัก

การทำอินเตอร์ลีฟจะมี 4 แบบ คือ

1) Block Interleaving

2) Inter-Block Interleaving

3) Diagonal Interleaving

4) Convolutional Interleaving

สำหรับในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM จะใช้เทคนิคการอินเตอร์ลีฟวิงแบบ diagonal interleaving โดยจะนำเอาข้อมูลจำนวน 456 บิตที่ได้จากการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นมาทำการอินเตอร์ลีฟวิงโดยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 8 บล็อก ๆ ละ 57 บิต และจะทำการกระจายข้อมูลออกเป็นแต่ละบล็อกให้เปลี่ยนไปในลักษณะทแยงมุม

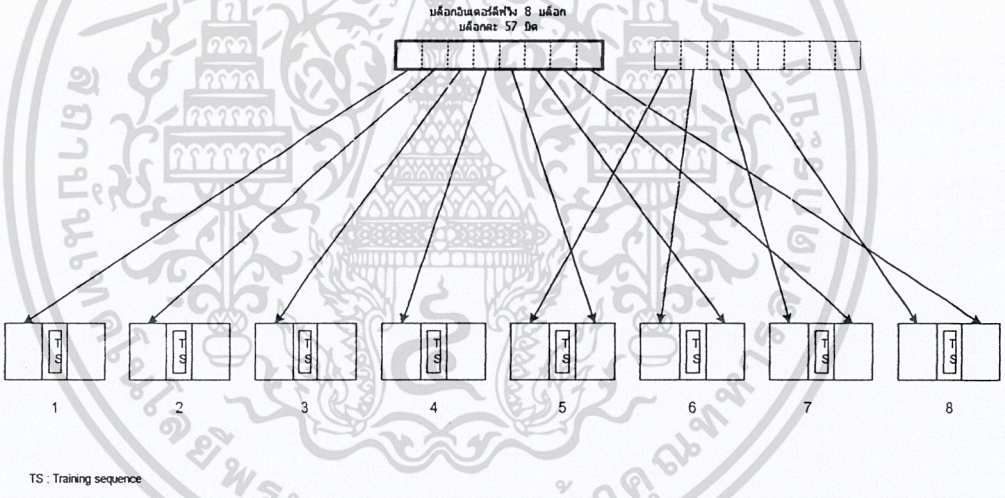
2.4 การมัลติเพล็ก (Multiplexing)

หลังจากที่มีการทำอินเตอร์ลีฟวิงแล้ว ข้อมูลที่ได้ทั้ง 8 บล็อกจะถูกนำมาปรับโครงสร้างของอัตราการส่งบิตข้อมูล (bits stream) ออกเป็นเบริสต์ซึ่งเป็นอีกลักษณะหนึ่งของกระบวนการการทำอินเตอร์ลีฟวิง เพื่อที่จะให้สามารถส่งไปในเฟรม TDMA ได้ ใน 1 เฟรมมีความยาวเท่ากับ 4.62 ms และประกอบด้วย 8 ไทม์สล็อต แต่ละไทม์สล็อตมีความยาวเท่ากับ 577 μs ข้อ

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้นำไฟล์นี้ขึ้นเผยแพร่ต่อในที่สาธารณะ ทั้งที่มีการหารายได้และไม่มีการหารายได้

มูล 8 บล็อกจากการทำอินเตอร์ลีฟวิงจะถูกจัดเข้าเบริสต์ดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นเบริสต์แบบ Normal burst ซึ่งมีลักษณะดังในรูปที่ 2.7 มีส่วนประกอบดังนี้

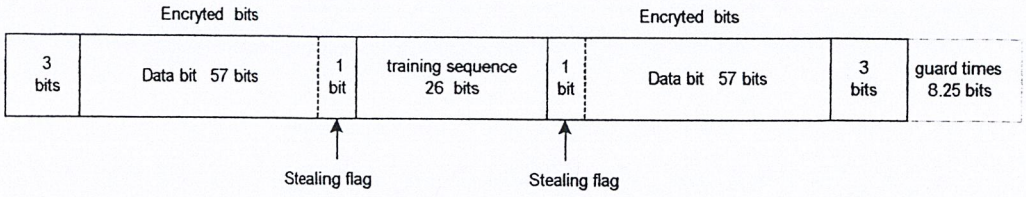
1) Tail bits มีขนาด 3 บิตอยู่ตรงส่วนเริ่มต้นและสิ้นสุดของเบริสต์ ทำหน้าบอกการเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละเบริสต์ tail bits จะมีค่าเป็น [0 0 0]
2) Encrypted bits มีขนาด 58 บิตประกอบด้วยข้อมูลในหนึ่งบล็อก 57 บิตและ stealing flag อีก 1 บิต ซึ่งใน 1 เบริสต์จะมี encrypted bits 2 ชุด สำหรับ stealing flag ที่เติมเข้าไปหนึ่งบิตนั้นจะใช้เป็นตัวบอกว่าขณะนั้นบิตข้อมูลในส่วนของ Data bit เป็นข้อมูลสัญญาณเสียงหรือสัญญาณซิกแนลลิง (signaling) เนื่องจากมีบางครั้งที่ Normal burst อาจถูกใช้ส่งสัญญาณซิกแนลลิง FACCH ชั่วคราว



รูปที่ 2.6 การจัดข้อมูลเข้าเบริสท์ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM

3) Training sequence bits มีขนาด 26 บิต มีไว้เพื่อทำหน้าที่ส่งค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณสื่อสารในขณะนั้น เพื่อให้อุปกรณ์อีควอไลเซอร์สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณในขณะนั้น
4) Guard times เป็นส่วนที่ว่างมีไว้เพื่อป้องกันการซ้อนทับกันของสัญญาณของช่องไทม์สล็อตข้างเคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Normal Burst

2.5 การมอดูเลทแบบจีเอ็มเอสเค (GMSK Modulation)

หลังจากที่ทำการมัลติเพล็กแล้ว ต่อไปจะเป็นการนำสัญญาณข้อมูลจากการมัลติเพล็กในแต่ละเบริสต์มาทำการมอดูเลทแบบ GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) ก่อนจะส่งสัญญาณผ่าน Channel ออกไป ซึ่งเป็นการมอดูเลทที่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟสอย่างต่อเนื่องและราบเรียบ

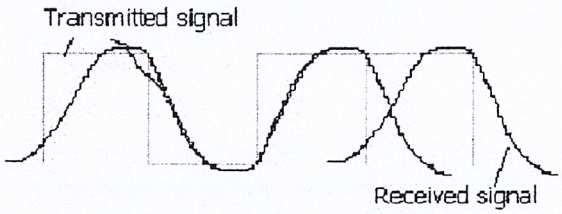
สำหรับเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณในระบบดิจิตอลมีลักษณะพื้นฐานอยู่ 3 ลักษณะคือ ASK (Amplitude Shift Keying) , FSK (Frequency Shift Keying) , PSK (Phase Shift Keying) สำหรับการเลือกวิธีการมอดูเลตที่ใช้ในการสื่อสารของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น จะมีข้อกำหนดที่ใช้ในการพิจารณาดังนี้

1) ประสิทธิภาพของการมอดูเลต
2) Bit error rate (BER)
3) ประสิทธิภาพของการใช้กำลังงาน
4) ข้อจำกัดของแถบความถี่
5) ความสามารถในการปรับเพื่อใช้งานกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

การมอดูเลทแบบ GMSK นั้นก่อนที่จะทำการมอดูเลทสัญญาณ จะนำเอาสัญญาณที่อยู่ในรูปของ Rectangular pulse ไปผ่านวงจรกรองความถี่แบบเกาส์เซียนก่อน เนื่องจากว่าสัญญาณ Rectangular pulse เมื่อส่งเข้าไปในช่องสัญญาณที่มีแบนวิดธ์ที่จำกัดจะส่งผลให้สัญญาณพัลส์ซึ่งมีการกระจายอยู่ในรูปแกนเวลา (Time domain) เกิดการกระจายไปรบกวนสัญญาณที่ติดกันดังรูปที่ 2-8 ซึ่งเรียกว่า Inter Symbol Interference (ISI) โดยการเกิดขึ้นของ ISI นี้จะทำให้การตรวจจับของภาครับอาจเกิดการผิดพลาดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



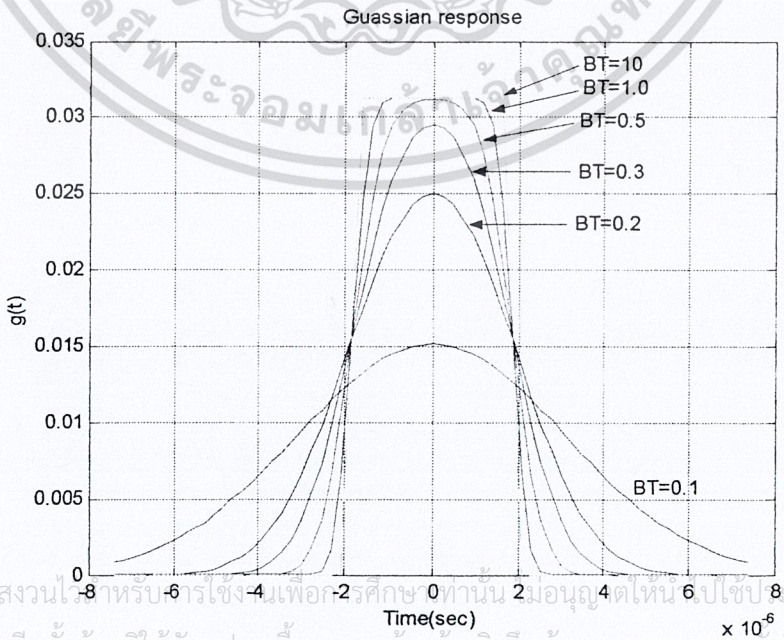
รูปที่ 2.8 ผลกระทบของการเกิด ISI

ฟังก์ชันสัญญาณผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่แบบเกาส์เซียนแสดงดังสมการที่ 2.1 และสเปคตรัมแสดงดังในรูปที่ 2.9

$$h(t) = \frac{1}{\delta T\sqrt{(2\pi)}}\exp\left(-\frac{t^2}{2\delta^2 T^2}\right) \quad (2.1)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{2\pi BT} \quad (2.2)$$

$$BT = f_{-3dB} / \text{bits rate} \quad (2.3)$$



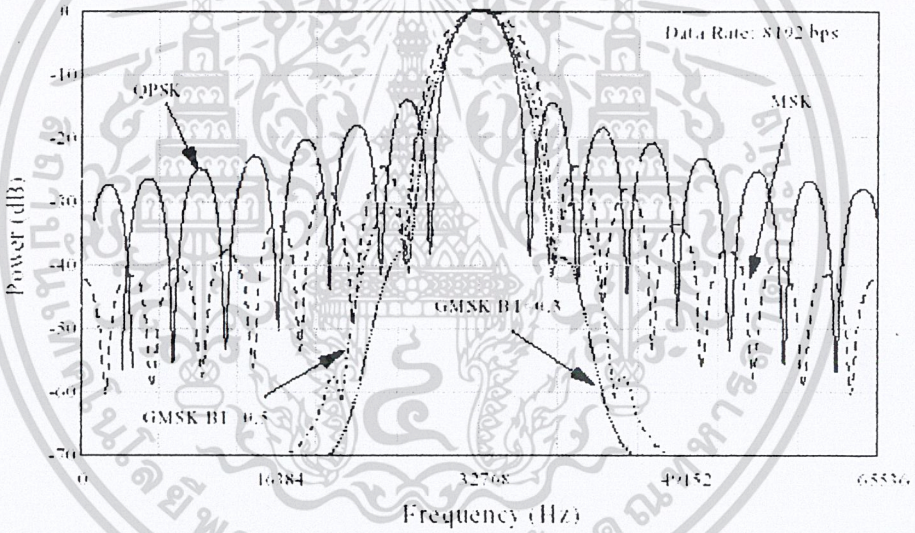
รูปที่ 2.9 สัญญาณพัลส์แบบเกาส์เซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46544

ค่า BT คือแถบความถี่นอมัลไลซ์ (Normalize Bandwidth) ของวงจรกรองความถี่สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ค่า BT = 0.3 เมื่อ B คือ แบนด์วิดธ์ของวงจร กรองความถี่ที่ 3 dB เมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้นสเปคตรัลของเกาส์เซียนจะลดลง (ถ้า BT = α จะหมายถึงไม่มีการกรองความถี่)

สำหรับสเปคตรัมของการมอดูเลทแบบ GMSK จะขึ้นอยู่กับค่า BT ค่าสเปคตรัมของ GMSK เท่ากับ MSK ที่ BT มีค่ามาก ๆ (Infinity) เมื่อเปรียบเทียบการมอดูเลทแบบ GMSK กับการมอดูเลทแบบอื่น GMSK จะให้สเปคตรัมที่ดีกว่ามากดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าสเปคตรัมของ GMSK จะมีสเปคตรัมที่กว้างกว่าการมอดูเลทแบบ QPSK แต่ว่าสเปคตรัมทางด้านข้างจะลดลงได้เร็วกว่าโดยที่ค่า BT น้อย ๆ จะลดลงได้เร็วกว่า



รูปที่ 2.10 สเปคตรัมของการมอดูเลทแบบ GMSK

2.6 อีควอไลเซอร์ (Equalizer)

อีควอไลเซอร์(Equalizer) เป็นวงจรที่ใช้ในการปรับรูปสัญญาณทางด้านรับให้มีคุณลักษณะที่ดีขึ้นเพื่อให้การดึงสัญญาณเดิมกลับคืนมามีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากว่าการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ (Channel) ในระบบสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิตอลจะเกิดปัญหาขึ้นที่เรียกว่า Intersymbol Interference (ISI) ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการมัลติพาท (Multipath)

โดยปกติอีควอไลเซอร์ที่ใช้ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จะสามารถปรับตัวได้(adaptive) นั่นก็คือคุณสมบัติหรือพารามิเตอร์ ๆ ของวงจรจะสามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เพื่อให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับสภาพช่องสัญญาณที่มักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ซึ่งเรียกว่าวงจรอีควอไลเซอร์แบบปรับค่าได้ (Adaptive equalizer)

หลักการทำงานของอีควอไลเซอร์แบบปรับตัวได้ จะแบ่งการส่งสัญญาณออกเป็น 2 ช่วงสลับกันไปตลอด ในช่วงแรกภาคส่งจะส่งชุดบิต Training sequence code (TSC) ไปให้ภาครับ ซึ่งรูปแบบของชุดบิต TSC นี้ที่ภาครับจะทราบล่วงหน้าอยู่แล้ว ชุดบิตเหล่านี้อาจจะมีรูปแบบตายตัวหรืออาจจะเป็น pseudorandom binary ก็ได้ สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM จะมี TSC อยู่ทั้งหมด 8 ชุด (TSC:0-7) ในช่วงที่ได้รับชุดของ TSC ภาครับจะทำการคำนวณและปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรฟิลเตอร์ในวงจรอีควอไลเซอร์ที่เหมาะสม สำหรับจัดการกับสภาพของช่องสัญญาณในขณะนั้น และในช่วงที่สองภาคส่งจะทำการส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้ตามไป ในช่วงนี้ภาครับจะใช้วงจรอีควอไลเซอร์ที่มีสัมประสิทธิ์ที่คำนวณไว้มาใช้ในการคืนสัญญาณข้อมูลเดิมกลับมาเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุด จะเห็นว่าคุณลักษณะของวงจรอีควอไลเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพช่องสัญญาณ และสามารถจัดการกับปัญหาของ ISI ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ชนิดของอีควอไลเซอร์

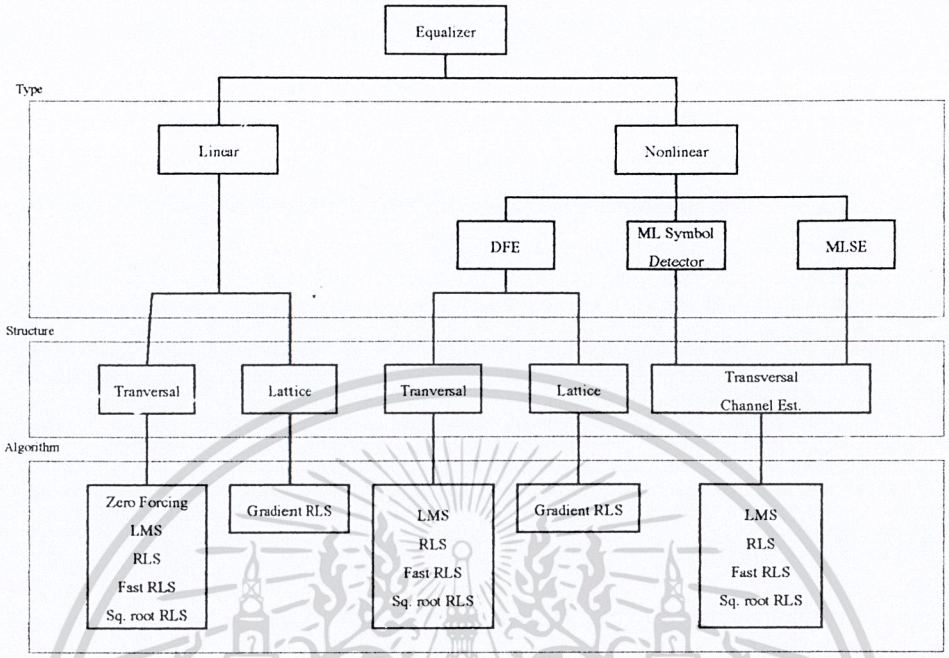
อีควอไลเซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อีควอไลเซอร์แบบเชิงเส้น (Linear equalizer) ซึ่งเป็นวงจรที่ไม่มีการนำเอาส่วนของเอาท์พุตมาป้อนกลับ (feedback) เพื่อใช้ในการคำนวณ และอีควอไลเซอร์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear equalizer) จะมีวงจรป้อนกลับมาใช้ในการคำนวณด้วย โดยปกติที่ภาครับจะประกอบด้วยส่วนของวงจรที่ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าสัญญาณ $\hat{d}_k$ ควรจะแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล d_k ที่มีค่าเท่าไร ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้การเทียบระดับของสัญญาณที่ได้รับกับค่าเทรชโฮลด์ที่ได้กำหนดไว้

ในรูปที่ 2.11 แสดงการแบ่งอีควอไลเซอร์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ จะเห็นว่าอีควอไลเซอร์ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นจะประกอบขึ้นจากโครงสร้างพื้นฐาน (structure) ที่เป็น Transversal หรือ Lattice ก็ได้ และที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คืออัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม ซึ่งอีควอไลเซอร์แต่ละประเภทจะมีอัลกอริทึมที่เหมาะสมแตกต่างกันไป

สำหรับเทคนิคของการทำอีควอไลเซชันแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear equalizer) จะถูกนำมาใช้งานมากกว่าเนื่องจากจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบเชิงเส้นมีอยู่ 3 วิธีดังนี้คือ

1) Dicision Feedback Equalizer (DFE)
2) Maximum Likelihood Symbol Detection
3) Maximum Likelihoood Sequence Estimation (MLSE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



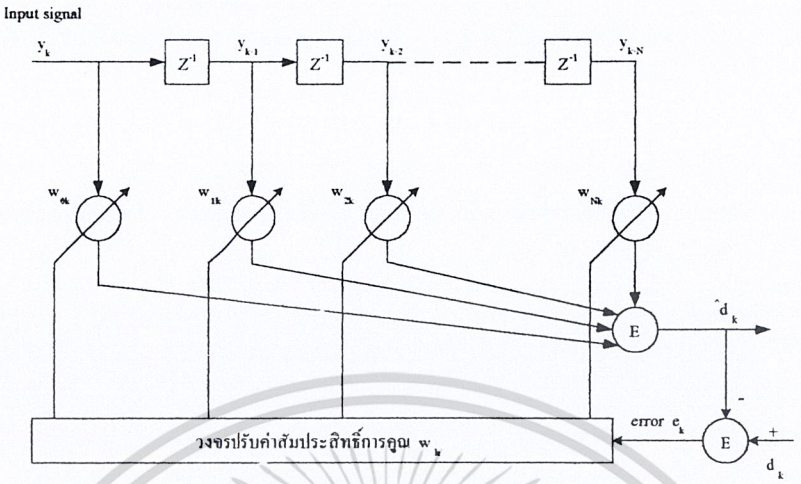
รูปที่ 2.11 การแบ่งชนิดของอีควอไลเซอร์

โครงสร้างพื้นฐานของวงจรอีควอไลเซอร์

วงจรอีควอไลเซอร์ในรูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างการทำงานของวงจรอีควอไลเซอร์ในช่วงเวลาที่อยู่ระหว่างการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณ (weights) ที่ขาเข้าของวงจรสัญญาณ y_k ค่าใหม่เข้าทุก ๆ ช่วงเวลา ค่าของ y_k นี้มีขนาดไม่แน่นอนเพราะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพของช่องสัญญาณและปริมาณของสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณในขณะนั้นๆ โครงสร้างของวงจรที่ต่อในลักษณะนี้มีชื่อเรียกว่า transversal filter ค่าสัมประสิทธิ์ของการคูณสัญญาณ w แต่ละตัวจะมีตัวแปรเวลา k ห้อยอยู่ด้วย เพื่อบ่งบอกว่าค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้แปรเปลี่ยนตามเวลาในช่วงที่ระบบกำลังหาค่าที่เหมาะสม ค่า w เหล่านี้อาจมีการปรับเปลี่ยนทุก ๆ ครั้งที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า k หรืออาจเปลี่ยนหลังจากที่มีข้อมูลเข้ามาจำนวนหนึ่งบล็อก

กรรมวิธีหรืออัลกอริทึม (Algrolithm) ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์จะขึ้นอยู่กับค่า e_k เป็นสำคัญ โดย e_k คือ ผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่า d_k กับค่า $\hat{d}_k$ ซึ่งโดยทั่วไปอัลกอริทึมที่ใช้ก็จะพยายามปรับสัมประสิทธิ์การคูณในทิศทางที่ทำให้ค่าฟังก์ชันต้นทุน (cost function) ที่สนใจมีขนาดลดต่ำลงเรื่อย ๆ ค่าฟังก์ชันต้นทุนที่นิยมใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์แบบหนึ่งก็คือค่า Mean square error (MSE) ระหว่างค่าของสัญญาณที่ต้องการกับค่าของสัญญาณที่ได้จากวงจรอีควอไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของวงจรอีควอไลเซอร์
ที่มีการปรับชุดสัมประสิทธิ์การคูณ

จากโครงสร้างของวงจรอีควอไลเซอร์ในรูปที่ 2-11 เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมได้โดยวิธีการต่อไปนี้

กำหนดให้เวกเตอร์ y_k แทนสัญญาณขาเข้าของวงจรอีควอไลเซอร์

$$y_k = [\, y_k \;\; y_{k-1} \;\; y_{k-2} \;\; \cdots \;\; y_{k-N} \,]^T \tag{2.4}$$

และให้เวกเตอร์ w_k แทนสัมประสิทธิ์การคูณของวงจรอีควอไลเซอร์

$$w_k = [\, w_{0k} \; w_{1k} \; w_{2k} \cdots w_{Nk} \,] \tag{2.5}$$

เราจะสามารถแสดงสัญญาณที่ขาออกซึ่งมีค่าเท่ากับ $\hat{d}_k = \sum_{n=0}^{N} w_{nk}\, y_{k-n}$ ในรูปของเวกเตอร์ได้เป็น

$$\hat{d}_k = y_k^T w_k = w_k^T y_k \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่วงจรทราบค่าของชุดข้อมูลที่แท้จริงอยู่แล้วค่าของ d_k จะกำหนดให้เท่ากับ x_k เพราะฉะนั้นค่าความแตกต่างหรือ error ที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น

$$e_k = d_k - \hat{d}_k = x_k - \hat{d}_k \tag{2.7}$$

จากสมการ (2-13) จะได้

$$e_k = x_k - y_k^T w_k = x_k - w_k^T y_k \tag{2.8}$$

$$|e_k|^2 = x_k^2 - w_k^T y_k y_k^T w_k - 2x_k y_k^T w_k \tag{2.9}$$

$$E[|e_k|^2] = E|x_k|^2 + w_k^T E[y_k y_k^T] w_k - 2E[x_k y_k^T] w_k \tag{2.10}$$

การคำนวณ $E[|e_k|^2]$ ในทางปฏิบัติจะใช้การหาค่าเฉลี่ยทางเวลาแทน และสังเกตว่าสัมประสิทธิ์การคูณ w_k มิได้ถูกนำไปใช้ในการหาค่าเฉลี่ยด้วย เพราะจะสมมติว่าค่า w_k ที่ใช้อยู่เป็นค่าได้รับจากการปรับจนเหมาะสมแล้วและไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

กำหนดให้เวกเตอร์ p แทนสหสัมพันธ์ไขว้ (cross correlation) ระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่ขาเข้า

$$\begin{aligned} p &= E[x_k y_k] \\ &= E[x_k y_k \quad x_k y_{k-1} \quad x_k y_{k-2} \quad \ldots \quad X_k y_{k-N}] \end{aligned} \tag{2.11}$$

และกำหนดให้เมทริกซ์ R แทนเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของขาเข้า (input correlation matrix) ที่มีขนาดเท่ากับ (N+1)*(N+1) หรือบางทีเรียกว่า โคแวเรียนซ์เมทริกซ์ของขาเข้า (input covariance matrix)

$$R = E[y_k y_k^T] = \begin{bmatrix} y_k^2 & y_k y_{k-1} & y_k y_{k-2} & \cdots & y_k y_{k-N} \\ y_{k-1} y_k & y_{k-1}^2 & y_{k-1} y_{k-2} & \cdots & y_{k-1} y_{k-N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{k-N} y_k & y_{k-N} y_{k-1} & y_{k-N} y_{k-2} & \cdots & y_{k-N}^2 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหาก x_k และ y_k มีลักษณะที่เป็นสเตชันเนรี (stationary) จะได้ว่าเทอมต่าง ๆ ใน p และ R ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากสมการข้างต้นจะได้ว่า

$$\text{Mean Square Error (MSE)} \quad : \xi = E[x^2] + w^T R w - 2p^T w \tag{2.13}$$

จากสมการนี้ เราสามารถจะหาค่าเวกเตอร์ w ที่ทำให้ค่า MSE มีขนาดต่ำที่สุด (Minimum MSE : MMSE) ได้โดยหาค่าเกรเดียนต์ของ ξ

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial w} = \left[\frac{\partial \xi}{\partial w_0} \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_1} \quad \cdots \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_N} \right]^T \tag{2.14}$$

เมื่อดิฟเฟอเรนชิเอตแต่ละเทอมโดยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การคูณแต่ละค่าจนครบก็จะได้

$$\nabla = 2Rw - 2p \tag{2.15}$$

กำหนดให้ $\nabla = 0$ เมื่อหาค่าที่ต่ำสุดของ MSE ผลลัพธ์ที่ได้คือชุดสัมประสิทธิ์ $\hat{w}$ ที่เหมาะสม

$$\hat{w} = R^{-1} p \tag{2.16}$$

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ไปแทนลงในสมการ (2-13) จะได้

$$\text{MMSE} : \xi_{min} = E[x_k^2] - p^T R^{-1} p = E[x_k^2] - p^T \hat{w} \tag{2.17}$$

อีควอไลเซอร์แบบ Maximum Likelihoood Sequence Estimation (MLSE)

เป็นอีควอไลเซอร์ที่ใช้ในการดึงเอาสัญญาณข้อมูลที่รับได้กลับคืนมา โดยจะสามารถพิจารณาสัญญาณได้ที่ละมาก ๆ และจะทำการทดสอบสัญญาณทุกรูปแบบที่เป็นไปได้เพื่อที่จะหาชุดสัญญาณที่ดีที่สุด ที่จะใช้ในการตัดสินใจที่จะดึงสัญญาณกลับคืนมาซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะต้องอาศัยการคำนวณมาก

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณในสภาวะต่าง ๆ นั้นอีควอไลเซอร์จะมีการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติไปสภาพของช่องสัญญาณ จึงจะต้องมีวิธีการหรืออัลกอริทึมเพื่อใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรฟิลเตอร์เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณ ซึ่งอัลกอริทึมนี้มีหลายตัวเช่น Least Mean Square (LMS)

2.7 Viterbi Decoding

Viterbi decode เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการถอดรหัสข้อมูลของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชั่น ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ

- Sequential Decoding เป็นวิธีการถอดรหัสที่นำ Tree diagram ของการเข้ารหัสมาใช้ในการออกแบบการทำงานของการถอดรหัส โดยที่จะนำอาข้อมูลที่รับได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ของ Tree diaram เพื่อหาเส้นทางที่มีข้อมูลที่รับมาใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมมากที่สุด
- Majority-logic หรือ Threshold Decoing เป็นวิธีการถอดรหัสที่มีการคำนวณทาง topological มาใช้ในการออกแบบการถอดรหัสเพื่อที่จะให้การถอดรหัสสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น แต่จะให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง
- Viterbi Decoding

สำหรับ Viterbi decoding จะเป็นวิธีการที่นิยมใช้งานมากที่สุด โดยใช้ Viterbi Algorithm ที่มีลักษณะการทำงานแบบ Maximum-likelihoood decoding algorithm ซึ่งจะนำข้อมูลที่รับได้มาใช้ในการประมวลผลเพื่อค้นหาเส้นทางที่อยู่ใน Tree diagram แล้วข้อมูลนั้นมาหาลักษณะของข้อมูลที่ถูกส่งมา

การถอดรหัสแบบ Viterbi Decoding จะมีรูปแบบสำหรับการถอดรหัสที่ใช้งานอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

- **Hard dicision** จะเป็นการพิจารณาข้อมูลที่รับเข้ามาซึ่งเป็นข้อมูลแบบไบนารี "0" หรือ "1" เพื่อมาหาความต่างของข้อมูล (Hamming distance) โดยเปรียบเทียบกับค่าใน Tree diagram เพื่อใช้ในการเลือกเส้นทาง
- **Soft dicision** จะเป็นการพิจารณาข้อมูลที่รับเข้ามาเพื่อมาหาความต่างของข้อมูลที่เป็น Euclidean distance แทนที่จะเป็นระยะของ Hamming distance ซึ่งจะทำการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สินใจข้อมูลที่รับเข้ามาโดยแบ่งเป็นระดับสัญญาณเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าของ Euclidean distance เพื่อจะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลใน Tree diagram

Viterbi Algorithm

Viterbi algorithm เป็นวิธีการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความแตกต่างของของข้อมูลที่รับเข้ามากับค่าที่อยู่ในเส้นทางต่างๆ ของ Trellis diagram เพื่อใช้ในการตัดสินใจหาเส้นทางที่ดีที่สุด แล้วนำค่าที่มาหาข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมที่ได้ส่งมา ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) พิจารณาแบ่งข้อมูลที่รับเข้ามาออกเป็นข้อมูลย่อยๆจำนวน m ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงนั้นมีขนาดของข้อมูลเท่ากับ n_0 บิต
2) ทำการวาด Trellis diagram ที่มีจำนวน state ในการทำงานเท่ากับ m state โดยจมีการพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ว่าจะถูกส่งมาเท่านั้น โดยสำหรับที่ state ของ Trellis diagram ตั้งแต่ L-1 ขึ้นไปนั้น ให้วาดเฉพาะเส้นทางที่จะพุ่งเข้าหาสภาวะของวงจรที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด
3) กำหนดค่าตัวแปร l = 1 และทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร metric ในสภาวะเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ให้มีค่าของ metric เท่ากับ 0
4) ทำการคำนวณหาค่าความแตกต่างของข้อมูล (distance) ระหว่างข้อมูลที่รับได้ชุดที่ l กับข้อมูลในเส้นทางในการเปลี่ยนแปลงสถานะใน Trellis diagram จาก state ที่ l ไปเป็น l+1
5) นำค่าที่คำนวณได้นั้นไปบวกกับค่า metric สะสมของstate l เพื่อคำนวณหาค่าของ metric สะสมใน state ที่ l+1 เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลไปยัง state นั้นๆ โดยในแต่ละ stateนั้น จะมีจำนวนเส้นทางทั้งหมดจำนวน 2^{k0} เส้นทางที่จะพุ่งเข้าstate เดียวกัน
6) พิจารณา ณ ตำแหน่งใน state ที่ l+1 ในแต่ละstateนั้น ทำการเลือกเส้นทางที่มีค่า metric สะสมที่มีค่าน้อยที่สุดที่พุ่งเข้าหาในแต่ละ state โดยทีเส้นทางที่ถูกเลือกนั้น จะถูกเรียกว่า "Survivor" ซึ่งจะเป็นเส้นทางที่ถูกเก็บไว้ทำการคำนวณใน state ต่อไป และสำหรับเส้นทางอื่นๆที่ไม่ได้ถูกเลือกนั้น จะถูกเรียกว่า "Forgetting "โดยจะถูกลบทิ้งออกไปจากระบบการตัดสินใจ
7) ถ้าหากว่า l นั้นมีค่าเท่ากับ m แล้วให้ทำงานในขั้นตอนต่อไปได้ แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่า จะมีต้องมีการเพิ่มค่า l ขึ้นอีก 1 จากนั้นจึงกลับไปทำงานที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่
8) เริ่มต้นพิจารณา ณ state ที่ m+1 ที่มีสภาวะของข้อมูลสถานะเป็น 0 ทั้งหมด ทำการเลือกเส้นทางที่เป็น "Survival" ซึ่งเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกที่เหลืออยู่ย้อนกลับไปจนกระทั่งถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะเริ่มต้นของการทำงานที่มีสภาวะในการทำงานเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งเส้นทางที่ได้นั้น จะเป็นเส้นทางที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่รับเข้ามามากที่สุด ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งมา โดยข้อมูลข่าวสารที่จะถูกส่งออกไปจากภาคถอดรหัสนั้น จะเป็นการส่งข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในเส้นทางส่งออกไปยกเว้นยกเว้นข้อมูล 0 จำนวน k_0 (L-1) บิต ที่อยู่ท้ายสุดนั้น จะถูกตัดทิ้งไป

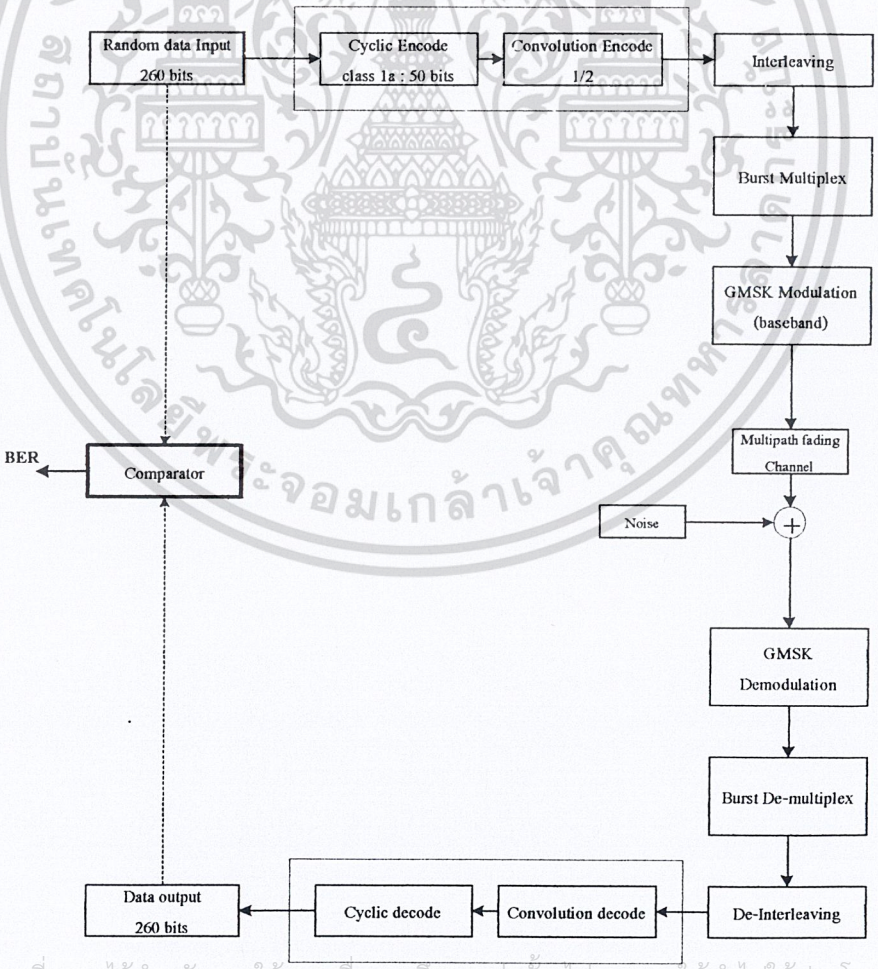
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการและการออกแบบ

สำหรับการออกแบบการทำงานของระบบนั้นจะแยกกระบวนการทำงานออกเป็น ภาคส่ง ภาครับ และรูปแบบของช่องสัญญาณการส่งผ่านข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ

3.1 ภาคส่ง (Transmister)

การเขียนโปรแกรมเพื่อทดลองกระบวนการทำงานของการ Simulate จะมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Simulate

สำหรับการเขียนโปรแกรมจะเริ่มตั้งแต่การที่เราจะทำการ Random สัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณ RZ (0,1) ซึ่งสมมติให้เป็นสัญญาณเสียงที่ทำการเข้ารหัสสัญญาณเสียง (Speech coding) แล้ว จำนวน 260 บิตขึ้นมาแล้วนำข้อมูลจำนวน 260 บิตนี้ไปสู่กระบวนการขั้นต่อ ๆ ไป ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding)

สำหรับกระบวนการในการเข้ารหัสช่องสัญญาณจะมีขั้นตอนการทำงานทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) สำหรับการสื่อสารแบบ Full rate จะมีข้อมูลจำนวน 260 บิต ที่ได้จากการสุ่มข้อมูลขึ้นมา

$$d = \begin{cases} \text{binary '1'} \\ \text{binary '0'} \end{cases} \tag{3.1}$$

(2) นำข้อมูลทั้ง 260 บิตมาแบ่งออกเป็น 3 class ดังนี้คือ

- class1a มีข้อมูล 50 บิต
- class1b มีข้อมูล 132 บิต
- class2 มีข้อมูล 78 บิต

(3) นำข้อมูลใน class1a จำนวน 50 บิต มาทำการเข้ารหัส Cyclic code ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM นั้นจะนำข้อมูลใน class1a ที่มีจำนวน 50 บิตมาทำการเข้ารหัส cyclic code (53,50) โดยการเติมบิตพาริตี้ (parity bits) เข้าไป 3 บิต และใช้โพลีโนเมียลกำเนิดคือ

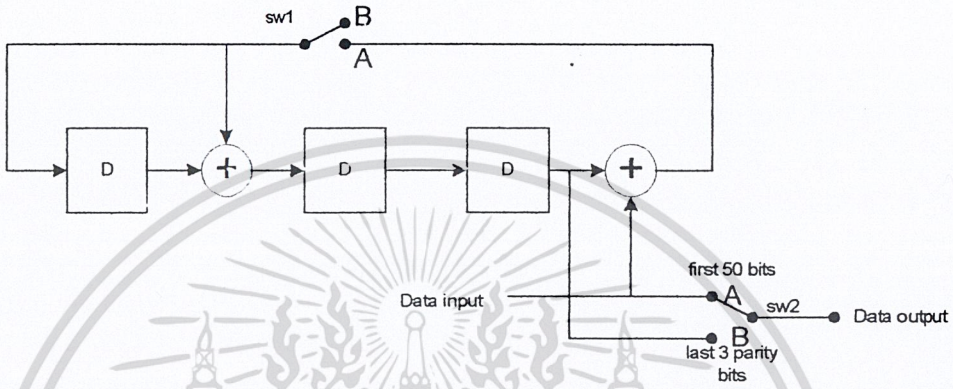
$$g(D) = 1 + D + D^3 \tag{3.2}$$

และวงจรโครงสร้างของชิฟท์รีจิสเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัสจะแสดงดังรูปที่ 3.2 เมื่อนำข้อมูลขนาด 50 บิต ไปหารแบบมอดูโล 2 ด้วยโพลีโนเมียลกำเนิดจะได้ผลลัพธ์ของการหาร และมีเศษเหลือจากการหารซึ่งจะเป็นบิตพาริตี้จำนวน 3 บิต ที่จะรวมส่งไปกับภาคส่งดังนั้นจะได้เอาท์พุตขนาด 53 บิต สามารถแสดงในรูปของโพลีโนเมียล ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d(0)D^{52} + d(1)D^{51} + \ldots\ldots\ldots + d(49)D^{3} + p(0)D^{2} + p(1)D + p(2) \qquad (3.3)$$

โดยที่ p(0) , p(1) , p(2) เป็นพาริตี้บิต



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของการเข้ารหัส Cyclic code

ในการเข้ารหัสนั้นเมื่อข้อมูลบิตที่ 1- 50 เข้ามาตำแหน่งของสวิทช์ sw1 และ sw2 จะอยู่ที่ตำแหน่ง A หลังจากครบ 50 บิตสวิทช์ทั้งสองจะสลับไปที่ตำแหน่ง B เพื่อเติมพาริตี้ 3 บิตเข้าไปกับบิตข้อมูล และทำการส่งข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสทั้ง 53 บิตออกไป ทางด้านรับก็จะรับข้อมูลมาและทำการตรวจสอบดูว่ามีการผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่ โดยนำข้อมูลที่รับได้มาหารด้วยโพลีโนเมียลกำเนิดตัวเดิม ถ้าไม่มีการผิดพลาดของบิตข้อมูลเกิดขึ้นค่าที่ได้จากการหารจะเท่ากับศูนย์หรือพาริตี้ทั้ง 3 ตัวเป็น [0 0 0] แต่ถ้ามีการผิดของบิตข้อมูลเกิดขึ้นพาริตี้จะไม่เท่ากับศูนย์

สำหรับการเขียนโปรแกรมการทำงานในการเข้ารหัส cyclic จะได้จากโพลีโนเมียลกำเนิด โดยจะทำการยกตัวอย่างของการเข้ารหัส Cyclic ได้ดังต่อไปนี้

<u>ตัวอย่างที่ 1</u> การเข้ารหัสไซคลิค

ในที่นี้เราจะสมมติข้อมูลใน class1a ที่ต้องการเข้ารหัสขึ้นมาเพียง 10 บิต ซึ่งมีข้อมูลคือ $d(D) = [1\,0\,0\,0\,0\,1\,1\,0\,1\,0]$ และ $g(D) = 1+D+D^3$ สามารถทำทดสอบการเข้ารหัส Cyclic code ได้ดังต่อไปนี้

<u>วิธีทำ</u>

$$\begin{array}{r} 10111111011 \\ 1011 \overline{)\ 10000110100000} \\ \underline{1011} \\ 0110 \end{array}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0 0 0 0

1 1 0 1

1 0 1 1

1 1 0 1

1 0 1 1

1 1 0 0

1 0 1 1

1 1 1 1

1 0 1 1

1 0 0 0

1 0 1 1

0 1 1 0

0 0 0 0

1 1 0 0

1 0 1 1

1 1 1 0

1 0 1 1

1 0 1 ← เศษที่เหลือ

ดังนั้น เอาท์พุตที่จะส่งออกไปจากการเข้ารหัส คือ 1 0 0 0 0 1 1 0 1 0 ***1 0 1***

Program

สำหรับโพลีโนเมียลที่ใช้เขียนโปรแกรมเข้ารหัส Cyclic code คือ

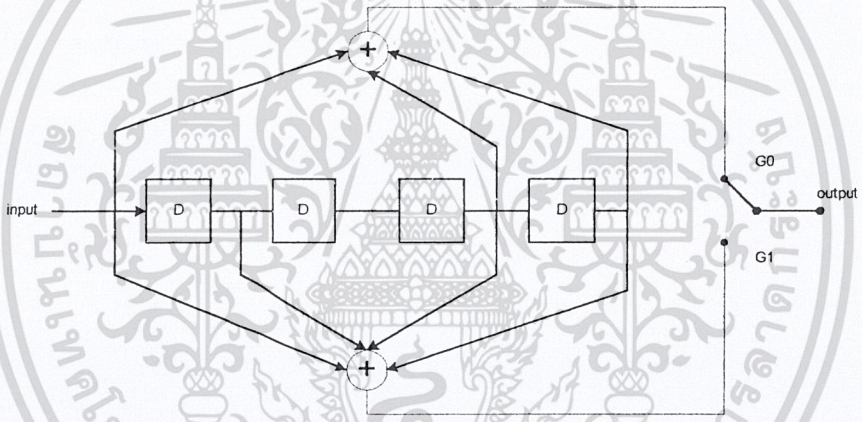
$g(D) = 1+D+D^3$

สามารถดูโปรแกรมได้ใน ***func_encyclic.m***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) การเข้ารหัส Convolution หลังจากที่มีการนำข้อมูลในคลาส 1a มาเข้ารหัส cyclic แล้วก็จะนำเอาข้อมูลที่ได้ 53 บิต แล้วนำไปรวมกับคลาส 1b ที่มีข้อมูลอยู่ 132 บิตและจะทำการเติม tail bits ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์(tail bits = [0 0 0 0]) เข้าไปอีก 4 บิตรวมข้อมูลเป็น 189 บิต (53+132+4) และนำข้อมูลทั้ง 189 บิต มาเข้ารหัสคอนโวลูชั่น อีกครั้งหนึ่ง เมื่อเข้ารหัสคอนโวลูชั่นแล้วจะได้ข้อมูลเอาท์พุตขนาด 378 บิต

สำหรับโครงสร้างของการเข้ารหัสคอนโวลูชั่นของระบบ GSM จะมีรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งใช้โพลีโนเมียลกำเนิด 2 ชุด คือ



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของการเข้ารหัส Convolution code

$$g_0 = 1 + D^3 + D^4 \quad (3.4)$$

$$g_1 = 1 + D + D^3 + D^4 \quad (3.5)$$

สำหรับการเข้ารหัสคอนโวลูชันในรูปที่ 3.4 จะการเข้ารหัสที่มีอินพุตเข้ามาครั้งละ 1 บิต และได้เอาต์พุตขนาด 2 บิต โดยสวิตช์ที่เอาท์พุตนั้นจะสลับไปมาระหว่าง g0 และ g1 ซึ่งสามารถเขียนรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงสถานะ (state transition) ซึ่งมีทั้งหมดเท่ากับ 2^4 = 16 สถานะ ได้ดังตารางที่ 3.1 และสามารถในรูปของ Trellis diagram ได้ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 2 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน

เมื่อเราทำการป้อนอินพุตขนาด 10 บิต คือ 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 ไปเข้ารหัสคอนโวลูชั่นในรูปที่ 2-5 และเติม tail bits เข้าไป 4 bits [0 0 0 0] ดังนั้นอินพุตที่จะเข้ารหัสจะมีทั้งหมด 14 บิต และจะได้เอาท์พุตขนาด 28 บิต ผลจากการเข้ารหัสมีดังนี้

Data input = 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0

Register1 = 1 0 1 0 1 1 0 0 1 ***0*** 0 0 0 ***0***

Register2 = 0 1 0 1 0 1 1 0 0 ***1*** 0 0 0 ***0***

Register3 = 0 0 1 0 1 0 1 1 0 ***0*** 1 0 0 ***0***

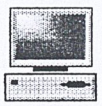
Register4 = 0 0 0 1 0 1 0 1 1 ***0*** 0 1 0 ***0***

g0 = 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1 1 0

g1 = 1 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0

ดังนั้น c(k) = 11 01 11 10 00 01 10 11 11 10 00 11 11 00

จากการเข้ารหัสคอนโวลูชั่นจะเห็นว่าเมื่ออินพุตบิตที่ 10 ผ่านการเข้ารหัสแล้วที่รีจิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวอาจจะไม่เป็นศูนย์ทั้งหมด ดังนั้น tail bits ที่เติมเข้าไป 4 บิตนั้นจะเติมเข้าไปเพื่อที่จะไปทำให้รีจิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวเป็นศูนย์ ก่อนที่จะทำการเข้ารหัสของข้อมูลชุดต่อไป (ระบบโทรศัพท์ GSM จะมีข้อมูลเข้ามาทุก ๆ 20 msec)


Program

สำหรับโพลีโนเมียลที่ใช้เขียนโปรแกรมเข้ารหัส Convolution คือ

$$g_0 = 1 + D^3 + D^4$$

$$g_1 = 1 + D + D^3 + D^4$$

สามารถดูโปรแกรมได้ใน ***func_enconv.m***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การเปลี่ยนสถานะ (state table)

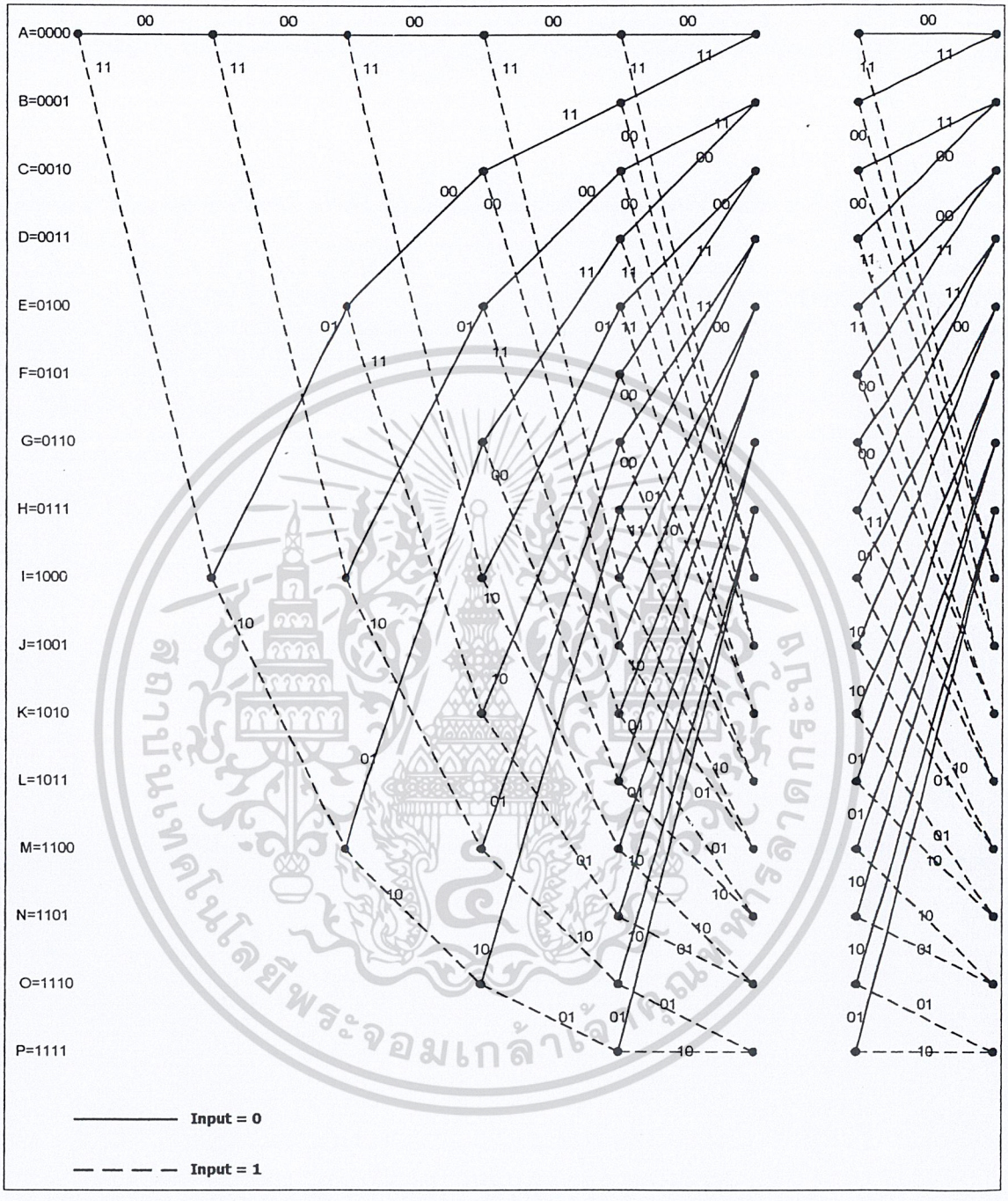
STATE	Present state	Input = 0		Input = 1	
		output	NS	output	NS
A	0000	00	0000	11	1000
B	0001	11	0000	00	1000
C	0010	11	0001	00	1001
D	0011	00	0001	11	1001
E	0100	00	0010	11	1010
F	0101	11	0010	00	1010
G	0110	11	0011	00	1011
H	0111	00	0011	11	1011
I	1000	01	0100	10	1100
J	1001	10	0100	01	1100
K	1010	10	0101	01	1101
L	1011	01	0101	10	1101
M	1100	01	0110	10	1110
N	1101	10	0110	01	1110
O	1110	10	0111	01	1111
P	1111	01	0111	10	1111

3.1.2 อินเตอร์ลีฟวิง (Interleaving)

หลังจากการเข้ารหัสช่องสัญญาณแล้วจะได้ข้อมูล 456 บิต ต่อจากนั้นจะนำเอาข้อมูลจำนวน 456 บิตที่ได้นั้นมาทำการอินเตอร์ลีฟวิงโดยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 8 บล็อก ๆ ละ 57 บิต และจะทำการกระจายข้อมูลออกเป็นแต่ละบล็อกให้เปลี่ยนไปในลักษณะทแยงมุม ซึ่งตำแหน่งของข้อมูลสำหรับการสื่อสารแบบ Full rate ที่เปลี่ยนไปจะแสดงได้ในตารางที่ 3.2 สำหรับการกระจายข้อมูลไปยังตำแหน่งต่าง ๆ นั้นจะมีสมการที่ใช้ในการกระจายข้อมูลดังนี้

$$i(B, j) = c(k) \qquad (3.6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Trellis diagram ของการเข้ารหัส Convolution code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ k : ตำแหน่งของข้อมูลอินพุตที่ได้จากการเข้ารหัสช่องสัญญาณขนาด 456 บิต
มีค่าเป็น 0,1,2,……,455

B : ตำแหน่งของบล็อกที่จะให้ข้อมูลอินพุตตำแหน่ง k ไปอยู่
สมการหาค่าของ B คือ

$$B = k \bmod 8 \tag{3.6.2}$$

ค่า B ที่ได้จะมีค่า 0,1,2,……,7

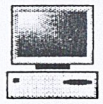
j : ตำแหน่งของแถวของแต่ละบล็อกที่จะให้ข้อมูลอินพุตตำแหน่ง k ไปอยู่
สมการหาค่าของ j คือ

$$j = 2((49k) \bmod 57) + ((k \bmod 8) \operatorname{div} 4) \tag{3.6.3}$$

ค่า j ที่ได้จะมีค่า 0,1,2,……,113

จะเห็นว่าค่าของ j ที่ได้นั้นจะมีการ 0 – 113 ก็เนื่องจากว่าจะมีการแยกตำแหน่งที่เป็นตำแหน่งคู่และคี่ออกเป็นอย่างละ 4 บล็อกนั้นเอง ซึ่งจะได้จำนวนบิตใน 1 บล็อกเท่ากับ 57 บิต

<u>หมายเหตุ</u> ตำแหน่งของบิตในตารางที่ 3.2 จะเป็นตำแหน่งที่ได้จากสมการ 3.6.1 แต่สำหรับการเขียนโปรแกรมการอินเตอร์ลีฟเพื่ออ้างถึงตำแหน่งในโปรแกรม Matlab จะมีการอ้างถึงตำแหน่งตั้งแต่ค่า 1 ดังนั้นจะต้องบวกด้วย 1 ในตารางจึงจะทราบตำแหน่งนั้น ๆ


Program

สำหรับสมการที่ใช้เขียนโปรแกรมเพื่อทำการอินเตอร์ลีฟวิง คือ

i (B, j) = c (k)

B = k mod 8

j = 2((49k) mod 57) + ((k mod 8) div 4)

สามารถดูโปรแกรมได้ใน ***func_interleaving.m***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

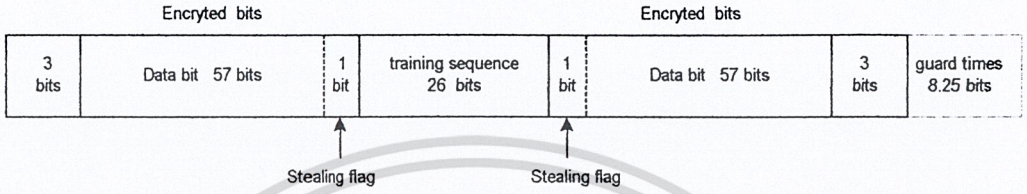
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งของการทำอินเตอร์ลีฟวิง (Full rate)

k mod 8	0	1	2	3	*k mod 8*	4	5	6	7
j = 0	k=0	57	114	171	*j = 1*	228	285	342	399
2	64	121	178	235	*3*	292	349	406	7
4	128	185	242	299	*5*	356	413	14	71
6	192	249	306	363	*7*	420	21	78	135
8	256	313	370	427	*9*	28	85	142	199
10	320	377	434	35	*11*	92	149	206	263
12	384	441	42	99	*13*	156	213	270	327
14	448	49	106	163	*15*	220	277	334	391
16	56	113	170	227	*17*	284	341	398	455
18	120	177	234	291	*19*	348	405	6	63
20	184	241	298	355	*21*	412	13	70	127
22	248	305	362	419	*23*	20	77	134	191
24	312	369	426	27	*25*	84	141	198	255
26	376	433	34	91	*27*	148	205	262	319
28	440	41	98	155	*29*	212	269	326	383
30	48	105	162	219	*31*	276	333	390	447
32	112	169	226	283	*33*	340	397	454	55
34	176	233	290	347	*35*	404	5	62	119
36	240	297	354	411	*37*	12	69	126	183
38	304	361	418	19	*39*	76	133	190	247
40	368	425	26	83	*41*	140	197	254	311
42	432	33	90	147	*43*	204	261	318	375
44	40	97	154	211	*45*	268	325	382	439
46	104	161	218	275	*47*	332	389	446	47
48	168	225	282	339	*49*	396	453	54	111
50	232	289	346	403	*51*	4	61	118	175
52	296	353	410	11	*53*	68	125	182	239
54	360	417	18	75	*55*	132	189	246	303
56	424	25	82	139	*57*	196	253	310	367
58	32	89	146	203	*59*	260	317	374	431
60	96	153	210	267	*61*	324	381	438	39
62	160	217	274	331	*63*	388	445	46	103
64	224	281	338	395	*65*	452	53	110	167
66	288	345	402	3	*67*	60	117	174	231
68	352	409	10	67	*69*	124	181	238	295
70	416	17	74	131	*71*	188	245	302	359
72	24	81	138	195	*73*	252	309	366	423
74	88	145	202	259	*75*	316	373	430	31
76	152	209	266	323	*77*	380	437	38	95
78	216	273	330	387	*79*	444	45	102	159
80	280	337	394	451	*81*	52	109	166	223
82	344	401	2	59	*83*	116	173	230	287
84	408	9	66	123	*85*	180	237	294	351
86	16	73	130	187	*87*	244	301	358	415
88	80	137	194	251	*89*	308	365	422	23
90	144	201	258	315	*91*	372	429	30	87
92	208	265	322	379	*93*	436	37	94	151
94	272	329	386	443	*95*	44	101	158	215
96	336	393	450	51	*97*	108	165	222	279
98	400	1	58	115	*99*	172	229	286	343
100	8	65	122	179	*101*	236	293	350	407
102	72	129	186	243	*103*	300	357	414	15
104	136	193	250	307	*105*	364	421	22	79
106	200	257	314	371	*107*	428	29	86	143
108	264	321	378	435	*109*	36	93	150	207
110	328	385	442	43	*111*	100	157	214	271
112	392	449	50	107	*113*	164	221	278	335

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 Burst Multiplexing

หลังจากที่มีการทำอินเตอร์ลีฟวิงแล้ว ข้อมูลที่ได้ทั้ง 8 บล็อก ก็จะนำข้อมูลทั้ง 8 บล็อก มาจัดเข้าเบริสท์แบบปกติ (Normal burst) ดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของ Normal Burst

สำหรับ Training sequence bits สำหรับการสื่อสารแบบ Full rate นั้นจะมีรูปแบบที่เป็นมาตรฐานอยู่ 8 รูปแบบ เรียกว่า Training Sequence Code (TSC) : 0-7 ซึ่งมีค่าดังนี้

ตารางที่ 3.3 Training sequence code

Training Sequence Code (TSC)	Training sequence bits
0	[0 0 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1]
1	[0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1]
2	[0 1 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 1 0]
3	[0 1 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 1 0]
4	[0 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 1]
5	[0 1 0 0 1 1 1 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0]
6	[1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1]
7	[1 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 0]

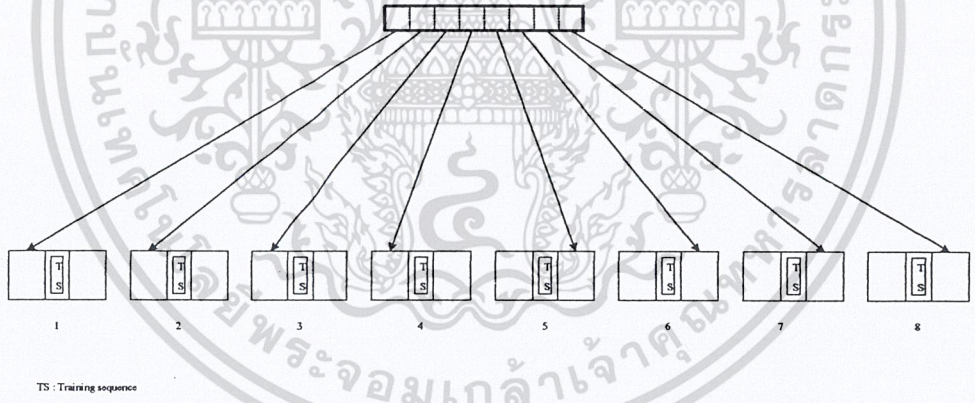
ส่วน 3 บิตแรกสุดและและหลังสุดเป็น tail bit ที่มีค่าเป็นศูนย์ [0 0 0] และ steailing flag เป็น “1” ดังนั้นข้อมูลใน 1 เบริสต์จะประกอบด้วย tail bit 6 บิต , ข้อมูลแต่ละบล็อก ๆ ละ 57 บิต 2 บล็อก , และ training sequence code อีก 26 บิต รวมเป็นข้อมูลทั้งหมด 148 บิต (3 + 57 + 1 +26 +1 + 57 + 3) ตัวอย่างของการจัดเบริสต์ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Burst(1) = [**0 0 0** 1 0 1 1 1 ... **1** TSC **1** 0 0 1 1 0 ... **0 0 0**]

สำหรับการจัดข้อมูลเข้าเบริสท์เราจะนำข้อมูลที่ได้จากการทำอินเตอร์ลีฟวิงทั้ง 8 บล็อกมาจัดเข้าเบริสท์ ดังในรูปที่ 3-6 ส่วนใน Encryted bits ที่ว่างเราจะทำการแรนดอมข้อมูลขึ้นใหม่ 57 บิตของแต่ละเบริสท์

สามารถดูโปรแกรมได้ใน ***func_burst.m***



รูปที่ 3.6 การจัดข้อมูลเข้าเบริสท์ของโปรแกรม ***func_burst.m***

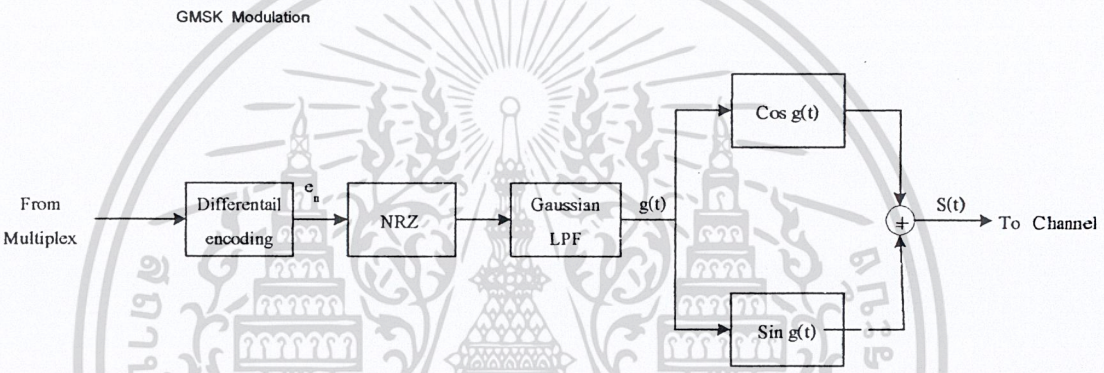
3.1.4 การมอดูเลทแบบจีเอ็มเอสเค (GMSK Modulation)

วิธีการมอดูเลทสัญญาณแบบ GMSK ซึ่งใช้ในการ simulate นี้นั้นจะมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงรูปที่ 3.7 ซึ่งก่อนที่จะทำการมอดูเลทจะนำสัญญาณที่จะเข้าไปมอดูเลทนั้นไปเข้ารหัสความแตกต่าง (Differential encoding) และเปลี่ยนเป็นสัญญาณ NRZ และหลังจากนั้นจะเอาสัญญาณ NRZ ไปเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเกาส์เซียล (Gaussian Low pass filter) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมอดูเลทแบบ GMSK ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM จะใช้อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Bit rate : f_b) เท่ากับ 270.833 Kbps โดยใช้ carrier มีความกว้างแบนวิดธ์เท่ากับ 200 KHz และใช้ค่า BT = 0.3 สำหรับรายละเอียดของแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.1.4.1 การเข้ารหัสสัญญาณเบสแบนด์ (Line coding) เป็นการนำสัญญาณที่ได้แต่ละเบริสต์จากการทำมัลติเพล็กมาเข้ารหัสสัญญาณเบสแบนด์ (line coding) โดยการเข้ารหัสดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการมอดูเลตแบบ GMSK

Differential encoding การเข้ารหัสสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล (Differential signal) จะเป็นการเข้ารหัสความแตกต่าง ซึ่งลักษณะของการเข้ารหัสและถอดรหัสดิฟเฟอเรนเชียลจะแสดงได้ ดังรูปที่ 3.7 สำหรับการเข้ารหัสนั้นจะได้จากสมการดังนี้

$$e_n = d_n \oplus d_{n-1} \qquad (3.7)$$

เมื่อ $\oplus$ เป็นการบวกแบบมอดูโล 2 และการถอดรหัสสัญญาณดิฟเฟอร์เรนเชียลสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$d_n = e_n \oplus d_n \qquad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 3 การเข้ารหัสและถอดรหัสดิฟเฟอร์เรนเชียล

Encoding

Input sequence	d_n		1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
Encode sequence	e_n	"1"	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1

"1" คือ บิตอ้างอิง (reference bit)

Decoding

Received sequence	e_n		0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
Decoded sequence	d_n	"1"	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1

NRZ encoding เป็นการเปลี่ยนระดับของสัญญาณที่ได้จากการเข้ารหัสดิฟเฟอร์เรนเชียล ซึ่งอยู่ในรูปของ Unipolar – NRZ (0,1) ให้เป็นสัญญาณแบบ Polar – NRZ (-1,1) โดยสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\alpha_i = 1 - 2\,e_n \tag{3.9}$$

ตัวอย่างที่ 4 การรหัส NRZ

Input RZ	e_n =	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
Output NRZ	α_i =	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1

3.1.4.2 Guassian Minimum Shift Keying (GMSK)

สัญญาณอินพุตของ GMSK จะเป็นสัญญาณ NRZ (Rectangular pulse shape) จึงจะต้องนำสัญญาณเหล่านี้ไปทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพัลส์ก่อน ซึ่งฟังก์ชั่นสัญญาณผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่แบบเกาส์เซียนคือ

$$h(t) = \frac{1}{\delta T\sqrt{(2\pi)}}\exp\left(-\frac{t^2}{2\delta^2\,T^2}\right) \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{2\pi BT} \tag{3.11}$$

เมื่อค่า $BT = 0.3$

และเมื่อนำสัญญาณอินพุตไปคูณแบบคอนโวลูชั่น (convolution) กับผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่แบบเกาส์เซียนจะได้สัญญาณดังสมการคือ

$$g(t) = h(t) * \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \tag{3.12}$$

โดยที่ฟังก์ชันของสัญญาณ Rectangular หาได้จาก

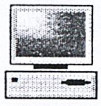
$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = 1 \qquad \text{for } |t| < \frac{T}{2} \tag{3.13.1}$$

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = 0 \qquad \text{otherwise} \tag{3.13.2}$$

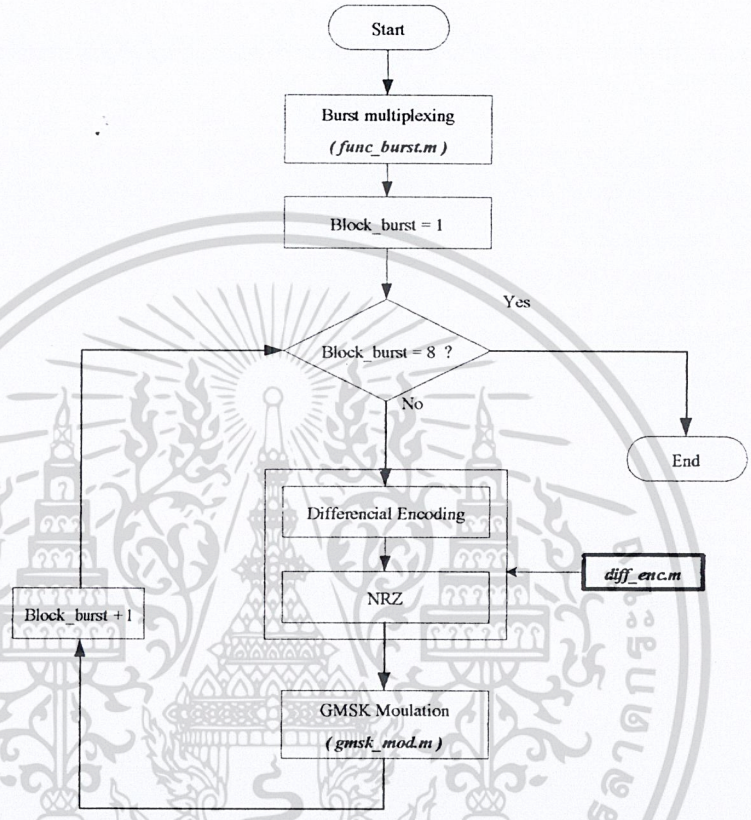
และเฟสของการมอดูเลทสัญญาณคือ

$$\theta(t) = \sum_i \alpha_i \pi h \int_{-\infty}^{t - iT} g(u)\, du \tag{3.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


Program

สำหรับการเขียนโปรแกรมการมอดูเลทมีขั้นตอนดังนี้ คือ



(1) การจัด Burst multiplexing จะแสดงดังรูปที่ 3-5 และสำหรับ Training sequence ในโปรแกรมจะใช้เพียงชุดเดียว คือ TSC(0)

(2) Differencial encode สมการที่ใช้คือ $e_n = d_n \oplus d_{n-1}$

(3) การเข้ารหัสสัญญาณเบสแบนด์ NRZ สมการที่ใช้คือ $\alpha_i = 1 - 2\,e_n$

(4) GMSK modulation สมการที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคือ 3.10 ถึง 3-14

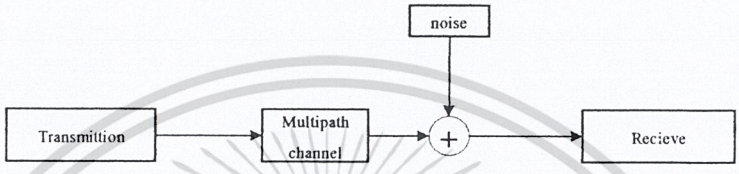
สามารถดูโปรแกรมได้ใน

- ***func_burst.m***
- ***diff_enc.m***
- ***gmsk_mod.m***

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

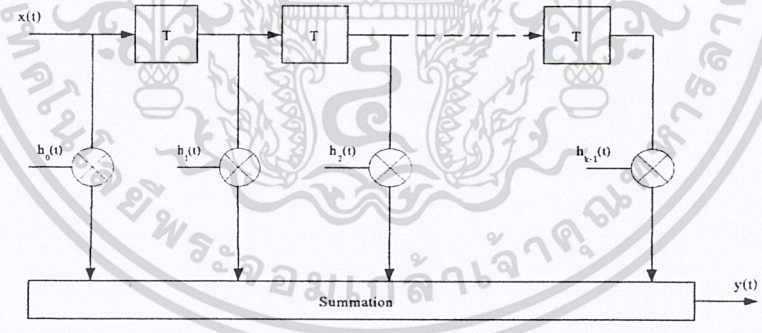
3.2 ช่องสัญญาณ (Channel model)

สำหรับการติดต่อสื่อสารผ่านช่องสัญญาณ (Channel) สัญญาณที่มายังตัวเครื่องรับนั้นจะเป็น Multipath fading ซึ่งจะมาจากหลาย ๆ เส้นทาง แต่ละเส้นทางจะมาถึงที่เวลาไม่เท่ากัน และมีขนาดของสัญญาณที่ต่างกัน และจะมีสัญญาณรบกวน (niose) ด้วย



รูปที่ 3.8 การส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ (Channel)

ช่องสัญญาณในลักษณะดังกล่าวจะเรียกว่า " Tapped delay line : TDL " หรือ " Finite Impulse Response : FIR " ลักษณะของ FIR จะแสดงดังในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Tapped delay line : TDL " หรือ " Finite Impulse Response : FIR "

สัญญาณอินพุตของช่องสัญญาณ $x(t)$, เอาท์พุตคือ $y(t)$ และ $h_n(t)$ คือผลตอบสนองอิมพัลซ์ของช่องสัญญาณ

ในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่า White gaussian noise (AWGN) ซึ่งสำหรับโปรแกรมจะใช้ฟังก์ชัน ***AWGN(X,SNR)*** ของ Matlab

สำหรับรูปแบบของการแพร่กระจายของสัญญาณซึ่งกำหนดขึ้นโดย ETSI (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999) จะมีอยู่ 5 รูปแบบ เช่น Tux,HTx เป็นต้น และสำหรับคอปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปคตรัมที่ใช้หาสเปคตรัมของกำลังงานของแต่ละแท็ปจะเป็นชนิด “Class” (GSM 05.05) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.15

$$S(f) = \frac{A}{\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_d}\right)^2}} \qquad (3.15)$$

สำหรับ $f \in -f_d, f_d$ และความถี่ดอปเปอร์สามารถหาได้จาก

$$f_d = v/\lambda$$

v : ความเร็วของยานพาหนะ (m/s)

λ : ความยาวคลื่น (m)

รูปแบบของช่องสัญญาณที่ใช้ในการ Simulate มีดังนี้

1. สภาพพื้นที่ที่เป็นชนบท (Typical case for rural area (RAx) : 6 tap setting) จะรับสัญญาณมา 6 tap และแบ่งออกเป็น 2 class มีรายละเอียดดังนี้คือ

Tap number	Relative time (μs)		Average relative power (dB)	
	(1)	(2)	(1)	(2)
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.1	0.2	-4.0	-2.0
3	0.2	0.4	-8.0	-10.0
4	0.3	0.6	-12.0	-20.0
5	0.4	-	-16.0	-
6	0.5	-	-20.0	-

โปรแกรม ***funch_rax6_class1.m*** และ ***funch_rax6_class2.m*** สำหรับคลาส 1 และ 2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สภาพภูมิประเทศที่เป็นเนินเขา (Typical case for hilly terrain (HTx) :12 tap setting) จะรับสัญญาณมา 12 tap และแบ่งออกเป็น 2 class มีรายละเอียดดังนี้คือ

Tap number	Relative time (μs)		Average relative power (dB)	
	(1)	(2)	(1)	(2)
1	0.0	0.0	-10.0	-10.0
2	0.1	0.2	-8.0	-8.0
3	0.3	0.4	-6.0	-6.0
4	0.5	0.6	-4.0	-4.0
5	0.7	0.8	0.0	0.0
6	1.0	2.0	0.0	0.0
7	1.3	2.4	-4.0	-4.0
8	15.0	15.0	-8.0	-8.0
9	15.2	15.2	-9.0	-9.0
10	15.7	15.8	-10.0	-10.0
11	17.2	17.2	-12.0	-12.0
12	20.0	20.0	-14.0	-14.0

โปรแกรม ***funch_htx12_class1.m*** และ ***funch_htx12_class2.m***

สำหรับในเคสของ HTx จะลดเหลือ 6 tap คือ

Tap number	Relative time (μs)		Average relative power (dB)	
	(1)	(2)	(1)	(2)
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.1	0.2	-1.5	-2.0
3	0.3	0.4	-4.5	-4.0
4	0.5	0.6	-7.5	-7.0
5	15.0	15.0	-8.0	-6.0
6	17.2	17.2	-17.7	-12.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม ***funch_htx6_class1.m*** และ ***funch_htx6_class2.m***

3. สภาพพื้นที่ในเมือง (Typical case for urban area (TUx) : 12 tap setting) จะรับสัญญาณมา 12 tap และแบ่งออกเป็น 2 class มีรายละเอียดดังนี้คือ

Tap number	Relative time (μs)		Average relative power (dB)	
	(1)	(2)	(1)	(2)
1	0.0	0.0	-4.0	-4.0
2	0.1	0.2	-3.0	-3.0
3	0.3	0.4	0.0	0.0
4	0.5	0.6	-2.6	-2.0
5	0.8	0.8	-3.0	-3.0
6	1.1	1.2	-5.0	-5.0
7	1.3	1.4	-7.0	-7.0
8	1.7	1.8	-5.0	-5.0
9	2.3	2.4	-6.5	-6.0
10	3.1	3.0	-8.6	-9.0
11	3.2	3.2	-11.0	-11.0
12	5.0	5.0	-10.0	-10.0

โปรแกรม ***funch_tux12_class1.m*** และ ***funch_tux12_class2.m***

สำหรับในเคสของ TUx จะลดเหลือ 6 tap คือ

Tap number	Relative time (μs)		Average relative power (dB)	
	(1)	(1)	(1)	(2)
1	0.0	0.0	-3.0	-3.0
2	0.2	0.2	0.0	0.0
3	0.5	0.6	-2.0	-2.0
4	1.6	1.6	-6.0	-6.0
5	2.3	2.4	-8.0	-8.0
6	5.0	5.0	-10.0	-10.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม ***funch_tux6_class1.m*** และ ***funch_tux6_class2.m***

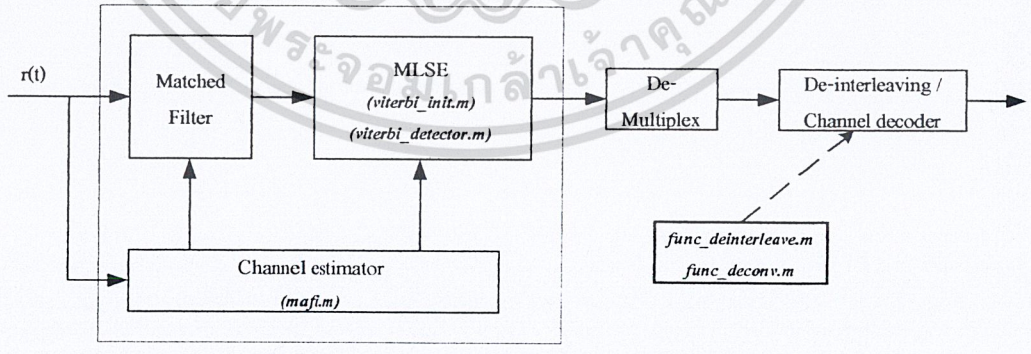
4. ในเคสที่สถานีฐานเล็ก ๆ (Typical case for very small cells (Tlx) : 2 tap setting) จะรับสัญญาณมาเพียง 2 tap และแบ่งออกเป็น 2 class มีรายละเอียดดังนี้คือ

Tap number	Relative time (μs)	Average relative power (dB)
1	0.0	0.0
2	0.4	0.0

โปรแกรม ***funch_tix.m***

3.3 ภาครับ (Reciver)

เมื่อเราส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณสื่อสาร (Channel) แล้วข้อมูลที่รับได้นั้นจะถูกสัญญาณรบกวนทำให้ข้อมูลที่รับได้นั้นจะจะเกิดการผิดพลาดขึ้นได้ ภาครับจะทำการดีเทคสัญญาณกลับคืนมาให้ถูกต้องมากที่สุด ซึ่งต้องอาศัยขั้นตอนการทำงานดังในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การทำงานของภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 การทำงานของภาครับนั้นจะทำการสุ่มสัญญาณ (Down sampling) ที่รับได้ r(t) ในแต่ละเบริสท์ โดยจะตรวจจับ (Detected) ค่าที่เหมาะสมเพื่อข้อมูลที่ถูกต้องมากที่สุดซึ่งการทำงานในส่วนนี้จะประกอบด้วย Channel estimator , matched filter และอีควอไลเซอร์แบบ Maximum-likelihood (MLSE)

เริ่มแรกตัว Channel estimator และ Matched filter จะรับสัญญาณ r(t) เข้ามา และตัว Channel estimator จะทำการประมาณค่าของสัญญาณที่รับได้โดยใช้ TSC ชุดเดียวกับภาคส่ง และส่งข้อมูลไปให้ Matched filter เพื่อที่จะทำการ dowan sampling สัญญาณลงมา และทั้ง Matched filter และ Channel estimator จะส่งสัญญาณไปยัง MLSE เพื่อให้หาค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลเดิมมากที่สุด

3.3.1 การดีมัลติเพล็กซ์ (De-multiplex) จะเป็นการนำบิตข้อมูลที่ประกอบอยู่ในเบริสท์ออกมาจากเบริสท์ทั้ง 8 เบริสต์

3.3.2 การดีอินเตอร์ลีฟวิง (De-Interleaving) สำหรับการทำดีอินเตอร์ลีฟนั้นจะเป็นการนำข้อมูลที่ได้ทำการอินเตอร์ลีฟนั้น กลับไปตำแหน่งเดิม

สามารถดูได้จากโปรแกรม ***func_deinterleave.m***

3.3.3 การถอดรหัสช่องสัญญาณ (Channel decode)

1. การถอดรหัสคอนโวลูชัน (Convolution decode) สำหรับการถอดรหัสคอนโวลูชั่นนั้นเราจะใช้ Trellis diagram ในรูปที่ 3.4 เข้ามาใช้ในการถอดรหัสด้วยวิธีที่เรียกว่า Viterbi Algorithm

ตัวอย่างที่เช่นเมื่อเราส่งอินพุต 5 บิต คือ 1 0 1 1 1 ไปเข้ารหัสคอนโวลูชั่น ดังนั้นเอาต์พุทที่ได้จากการเข้ารหัสคือ 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 การถอดรหัสแสดงได้ดังในรูปที่ 3.11

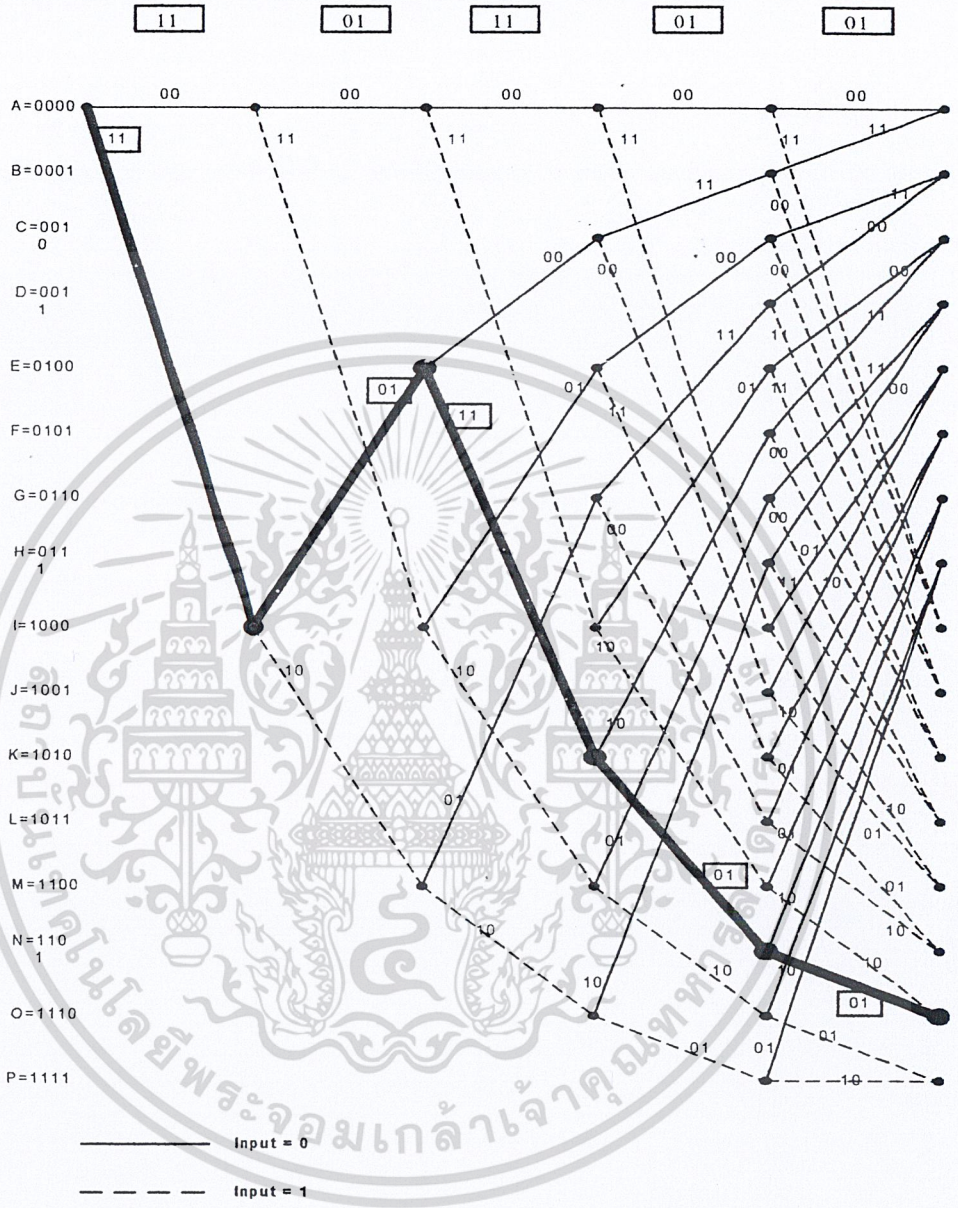
สำหรับในที่นี้จะแสดงให้ดูเพียง 5 บิต ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการถอดรหัสก็คือ 1 0 1 1 1

Program

สำหรับการถอดรหัส Convolution code ดูได้จากโปรแกรม

func_deconv.m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการถอดรหัส Convolution code โดยใช้ Trellis diagram

2. การถอดรหัสไซคลิค (Cyclic decode)

จากตัวอย่างที่ 1 เมื่อเราทำการเข้ารหัสแล้ว เมื่อภาครับได้รับข้อมูลแล้วนำข้อมูลนั้นไปหารแบบมอดูโล 2 ด้วยโพลีโนเมียลกำเนิดตัวเดิม ถ้าไม่มีการผิดพลาดของบิทข้อมูล เศษของการหารจะเป็นศูนย์ทั้งหมดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างที่1 ข้อมูลที่รับได้คือ 1000011010***101***

<u>วิธีทำ</u>

```
                 10111111011
          ┌──────────────
1011      │ 1000011010101
          1011
           01101
           1011
            1101
            1011
             1100
             1011
              1111
              1011
               1000
               1011
                01110
                1011
                 1011
                 1011
                 000   ← เศษที่เหลือจากการหาร
```

ถ้ามีบิตข้อมูลผิดไปเศษที่ได้จากการหารจะไม่ได้เท่ากับศูนย์ ที่ภาครับก็จะรู้ว่ามีการผิดพลาดเกิดขึ้น จากตัวอย่างถ้าข้อมูลที่รับได้ คือ 1001011010101 ซึ่งมีการผิดที่บิตที่ 4 ผลที่ได้จากการหารจะไม่เท่ากับศูนย์ดังนี้

<u>วิธีทำ</u>

```
                 10101001111
          ┌──────────────
1011      │ 1001011010101
          1011
           01001
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 0 1 1

0 1 0 1 0

1 0 1 1

0 0 1 1 0 1

1 0 1 1

1 1 0 0

1 0 1 1

1 1 1 1

1 0 1 1

1 0 0 ← เศษที่เหลือจากการหาร

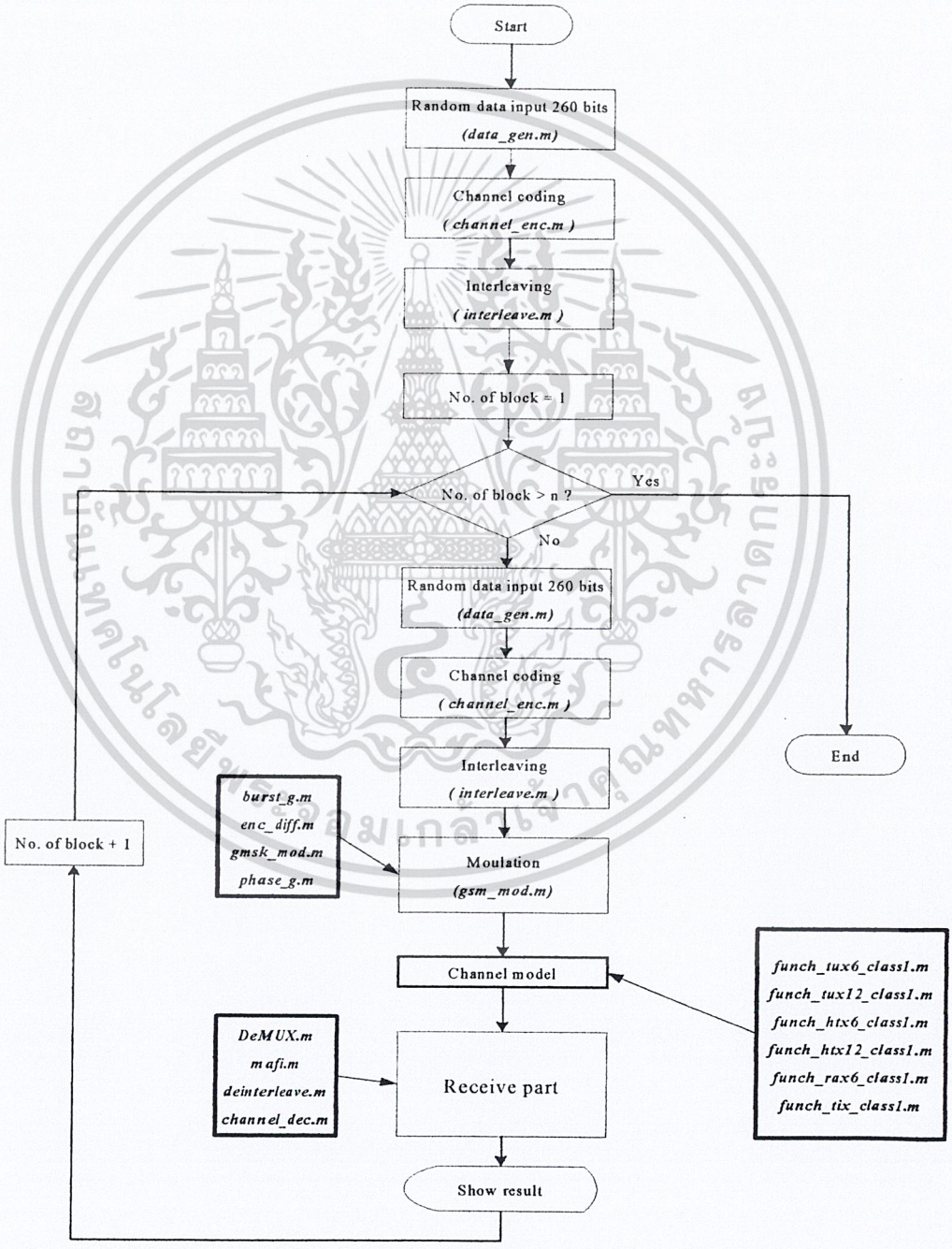
3.3.4 การหาการผิดพลาดของบิต (Bit Error rate : BER)

เมื่อเราทำการถอดรหัสของสัญญาณเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราจะนำข้อมูลที่รับไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ส่งเข้ามาเพื่อหาอัตราการผิดพลาดของบิทแบบบิทต่อบิท ของข้อมูลทั้ง 260 บิท และการผิดพลาดในแต่ละคลาส (Class 1a,1b,2) ด้วย

สำหรับฟังก์ชันของ Matlab ที่หา BER คือ >> biterr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทำงานที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะเป็นการทำงานของโปรแกรมที่มีข้อมูลไบนารีเพียง 260 บิต เท่านั้น ถ้าเราต้องการทดลองส่งข้อมูลมากกว่า 260 บิต จะมีการทำงานดังในรูปที่ 3-11 ในการทดลองในส่วนนี้นั้นเราจะให้ทำการกำหนดจำนวนชุดของข้อมูลที่จะทำการทดลอง ซึ่งข้อมูลแต่ละชุดจะเท่ากับ 260 บิต ถ้าเรากำหนดจำนวนชุดของข้อมูลมาก ๆ จะทำให้เวลาที่ใช้ในการนานมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

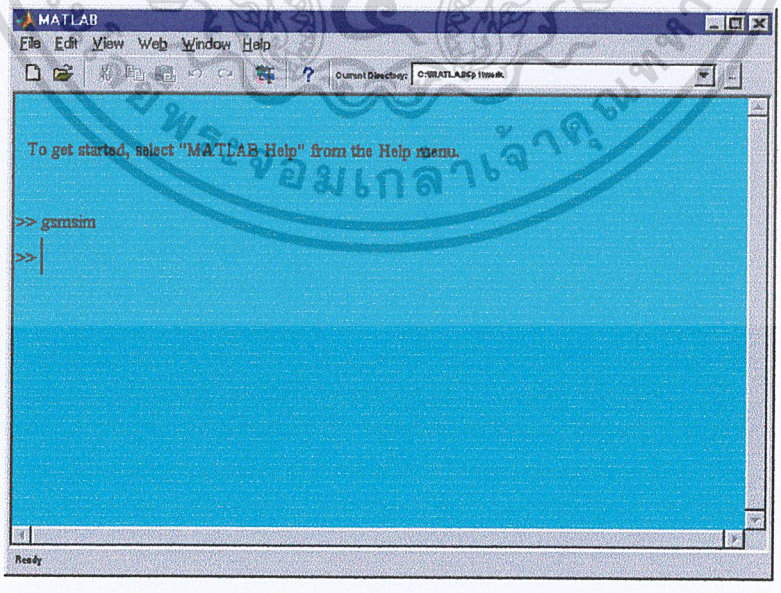
รูปที่ 3.12 การทำงานของการส่งข้อมูลมากกว่า 260 บิต

บทที่ 4
การใช้โปรแกรม GUI ของการ Simulate
และ
การทดลอง

สำหรับโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในที่นี้จะเป็นเวอร์ชัน 6 ส่วนลักษณะของโปรแกรมที่ใช้ในการ simulate นั้นจะใช้เป็น Graphic User Interface (GUI) ซึ่งเป็นการใช้งานอีกลักษณะหนึ่งของตัวโปรแกรม Matlab ในบทนี้จะขอกล่าวถึงการใช้งานโปรแกรมจำลองการทำงานและผลของการทดสอบโปรแกรม ซึ่งการที่จะใช้งานโปรแกรมจำลองการทำงานนี้ได้จะต้องมีโปรแกรม Matlab อยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์เสียก่อน เมื่อมีโปรแกรมเรียบร้อยแล้วจะเริ่มการทดลองดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Matlab ขึ้นมาซึ่งมีลักษณะดังในรูปที่ 4.1 แล้วพิมพ์คำว่า “gsmsim” เพื่อเข้าสู่โปรแกรมจำลองการทำงาน

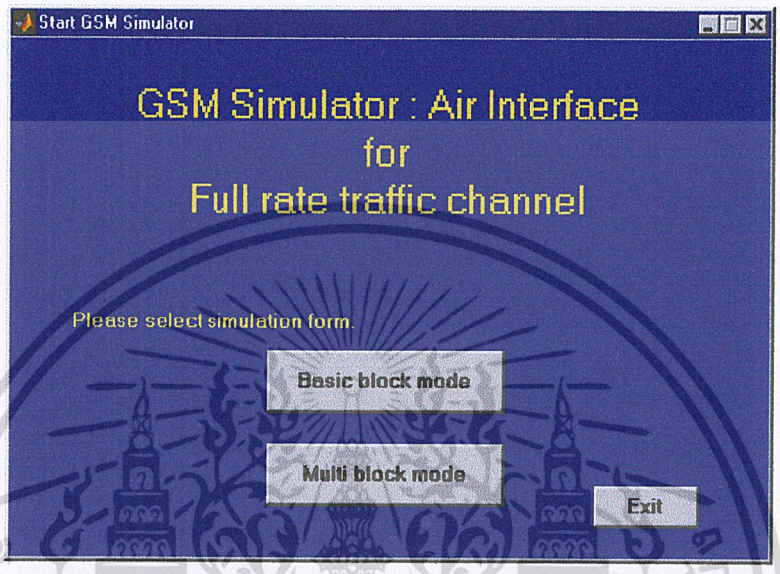
```
>> gsmsim
```



รูปที่ 4.1 ลักษณะของโปรแกรม Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

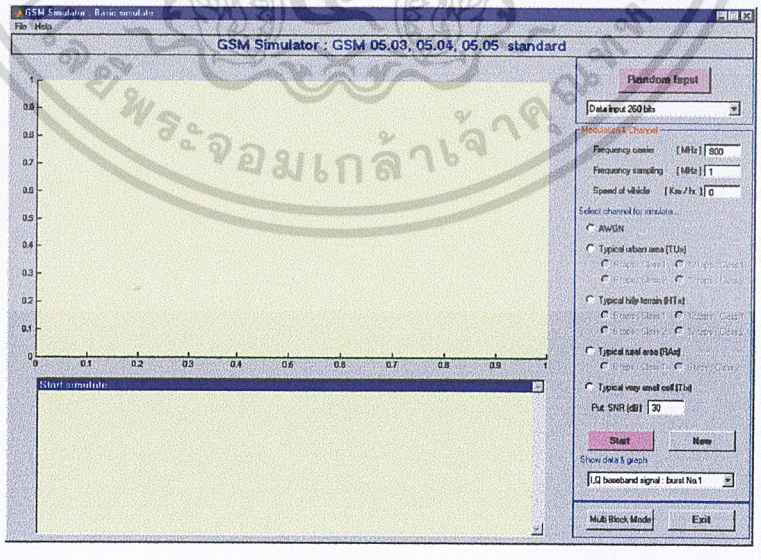
2. จะมีหน้าจอให้เลือกดังในรูปที่ 4.2 ระหว่าง Single block mode ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของข้อมูลเพียงบล็อกเดียวคือ 260 บิต และ Multi block mode ซึ่งจะเป็นการจำลองของข้อมูลหลายชุด ๆ ละ 260 บิต โดยที่ผู้ใช้จะต้องกำหนดจำนวนชุดของข้อมูลลงไป



รูปที่ 4.2 หน้าแรกของโปรแกรมจำลองการทำงาน

3. คลิกเลือกที่

จะขึ้นหน้าจอดังในรปที่ 4-3

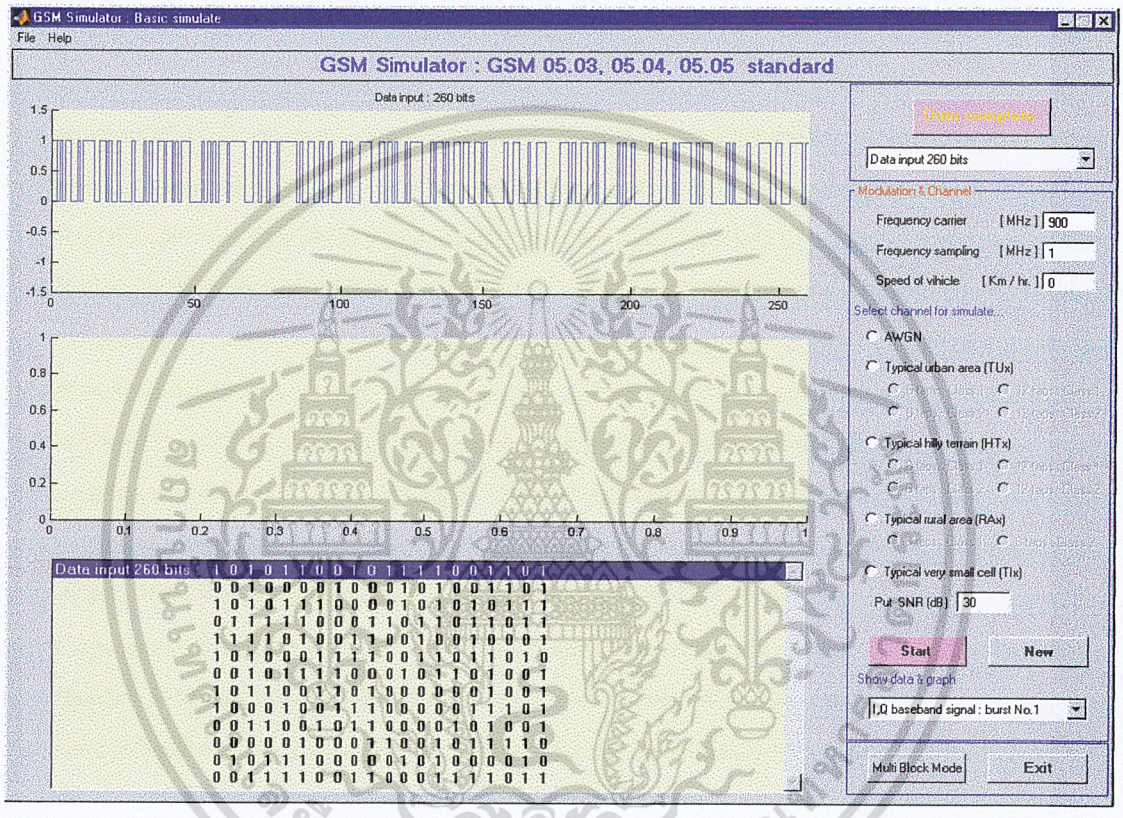


รูปที่ 4.3 หน้าจอของ Basic block mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หลังจากจะเริ่มทำการทดลองโปรแกรมโดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1 แรนดอมสัญญาณอินพุต 260 บิตโดยคลิ้กที่ Random Input ปุ่มจะได้ข้อมูลที่เป็นไบนารี “0” และ “1” จำนวน 260 บิตดังในรูปที่ 4.4



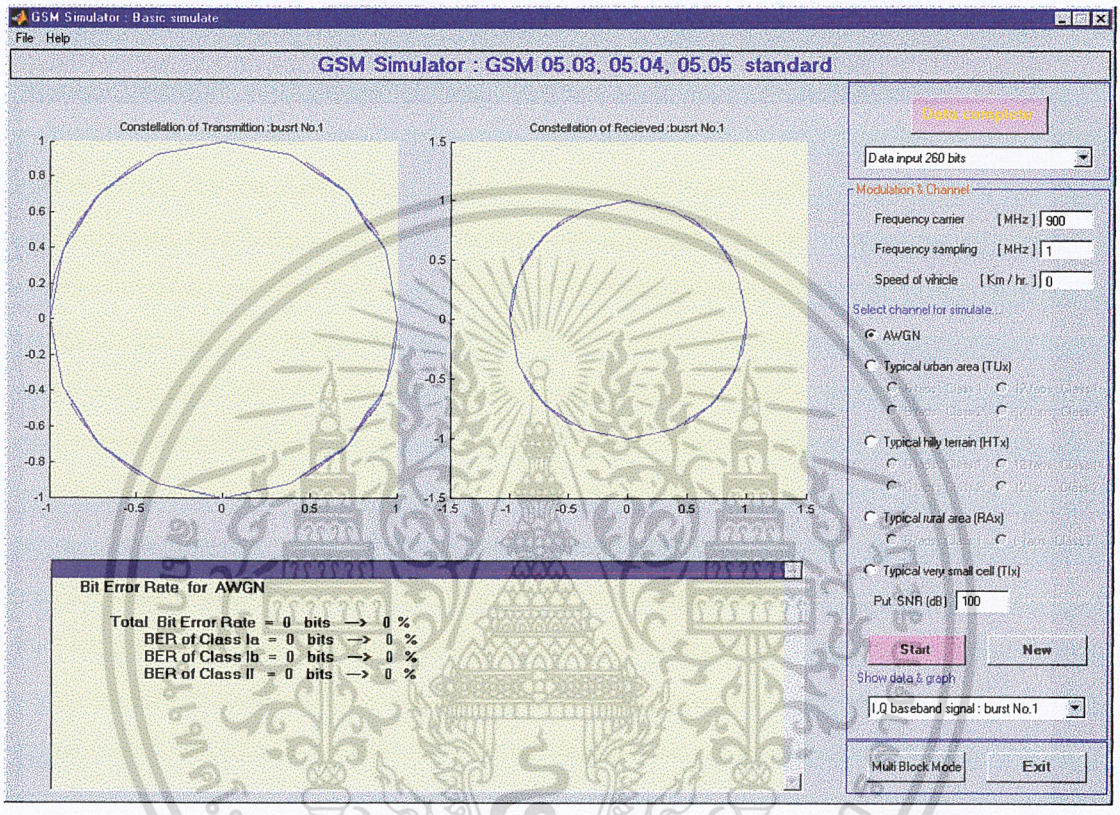
รูปที่ 4.4 กราฟข้อมูลอินพุตและบิตข้อมูล 260 บิต

ซึ่งที่ปุ่ม “Random Input” นี้จะคลิ้กได้ครั้งเดียวของการ simulate ถ้าต้องการที่แรมดอมข้อมูลใหม่จะต้องคลิ้กที่ปุ่ม New เพื่อทำการแรนดอมข้อมูลใหม่

และสามารถดูข้อมูลบิตและกราฟของข้อมูลอื่น ๆ อีกได้ เช่น ข้อมูลในคลาส 1a จำนว 50 บิต ,คลาส 1b จำนวน 132 บิต ,คลาส 2 จำนวน 78 บิต, ข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส Cyclic code จำนวน 53 บิต และข้อมูลที่จะเข้ารหัสและที่ได้จากการเข้ารหัส Convolution code จำนวน 189 บิต และ 378 ยิต ามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 หลังจากนั้นจะต้องเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการที่จะ simulate ซึ่งช่องสัญญาณที่เป็น AWGN จะเป็นช่องสัญญาณปกติของการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณและค่า SNR ที่มีค่าสูง ๆ จะทำให้สัญญาณที่รับได้ถูกต้องมากไม่มี BER เกิดขึ้น ดังในรูปที่ 4.5 ที่ค่า SNR = 100 dB

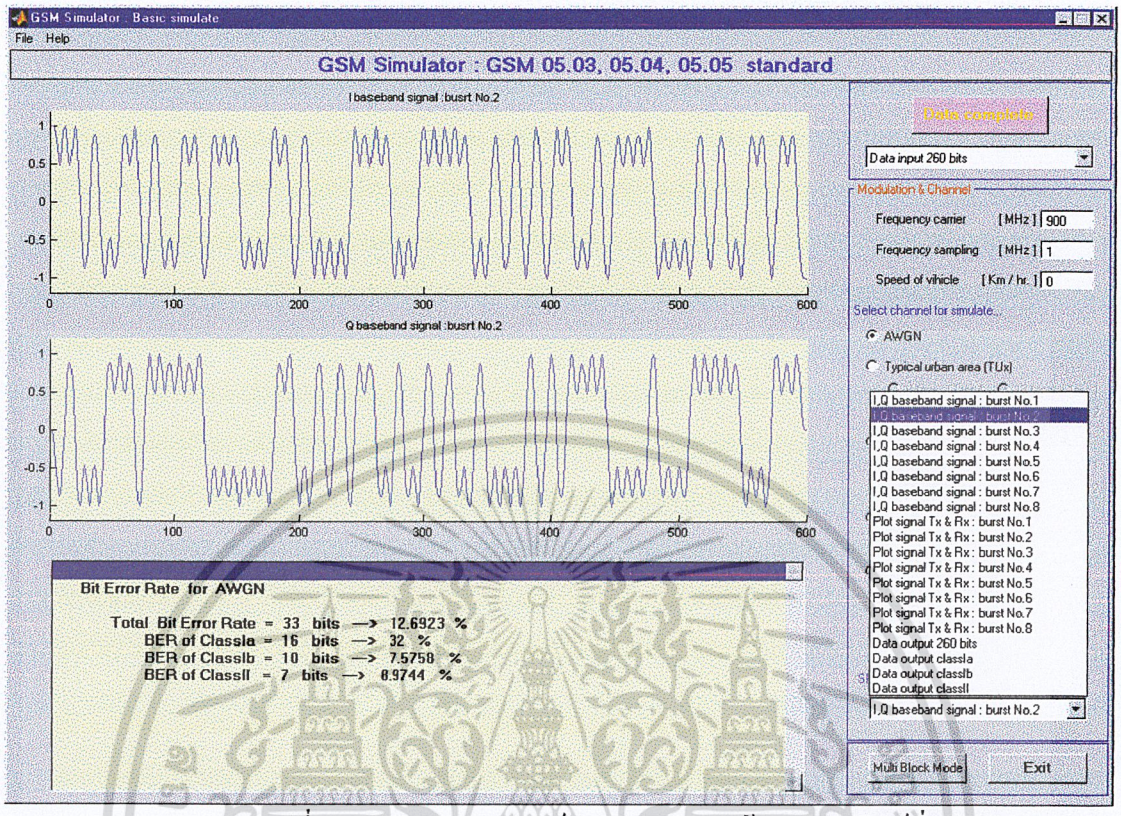


รูปที่ 4.5 กราฟของข้อมูลที่ส่งและรับได้ของบิตข้อมูลในเบริสท์ที่ 1
ของ Channel ที่เป็น AWGN เมื่อ SNR = 100 dB

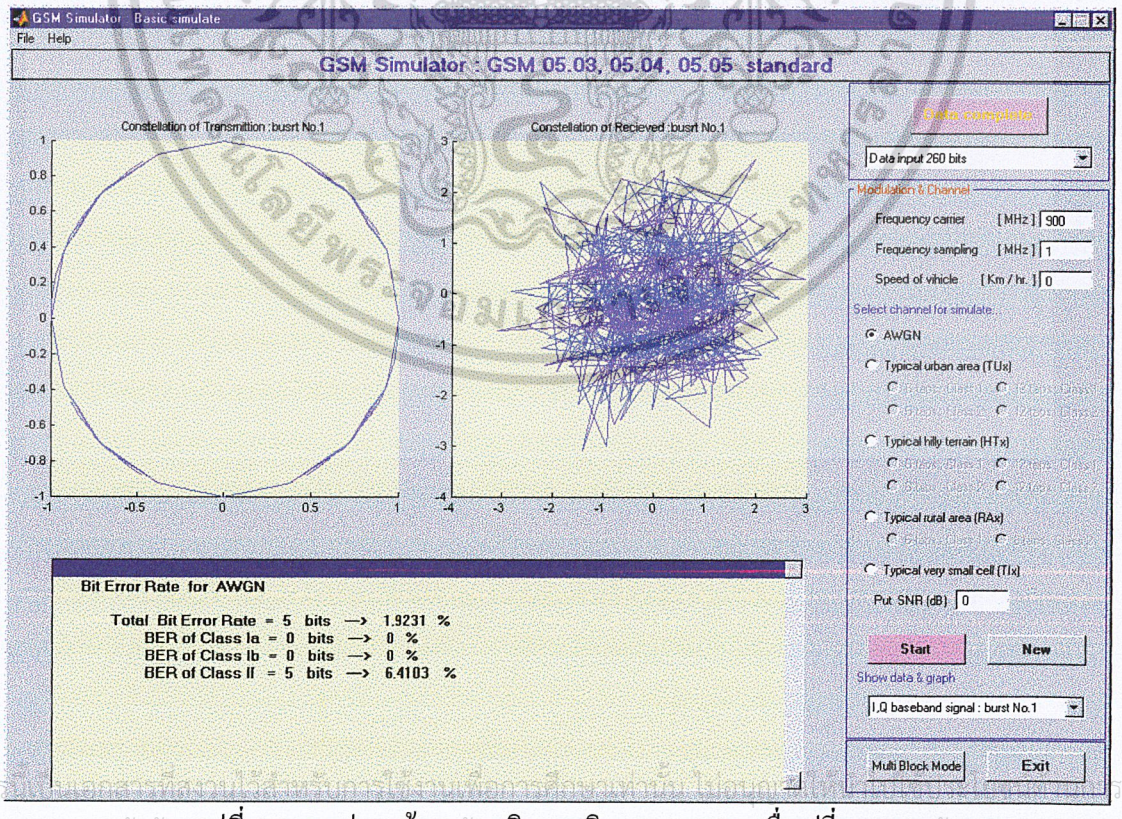
4.3 จากนั้นคลิ้กที่ปุ่ม Start จะได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะแสดงกราฟข้อมูลในเบริสต์ที่ 1 ให้เห็น และจะแสดงการผิดพลาดของบิตข้อมูล (BER) ที่รับได้ในแต่ละคลาสให้เห็นด้วย โดยที่ค่าของ SNR = 100 dB และเมื่อเราลดค่าของ SNR ให้น้อยลงค่าของ BER จะมากขึ้น

และสามารถที่จะดูกราฟของสัญญาณเบสแบนด์ I และ Q ของแต่ละเบริสท์ได้โดยเลือกที่ Popup : Show data & graph เช่นถ้าต้องการดูสัญญาณ I,Q ของเบริสต์ที่ 2 จะแสดงได้ดังในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สัญญาณเบสแบนด์ I และ Q ของข้อมูลในเบริสท์ที่ 2

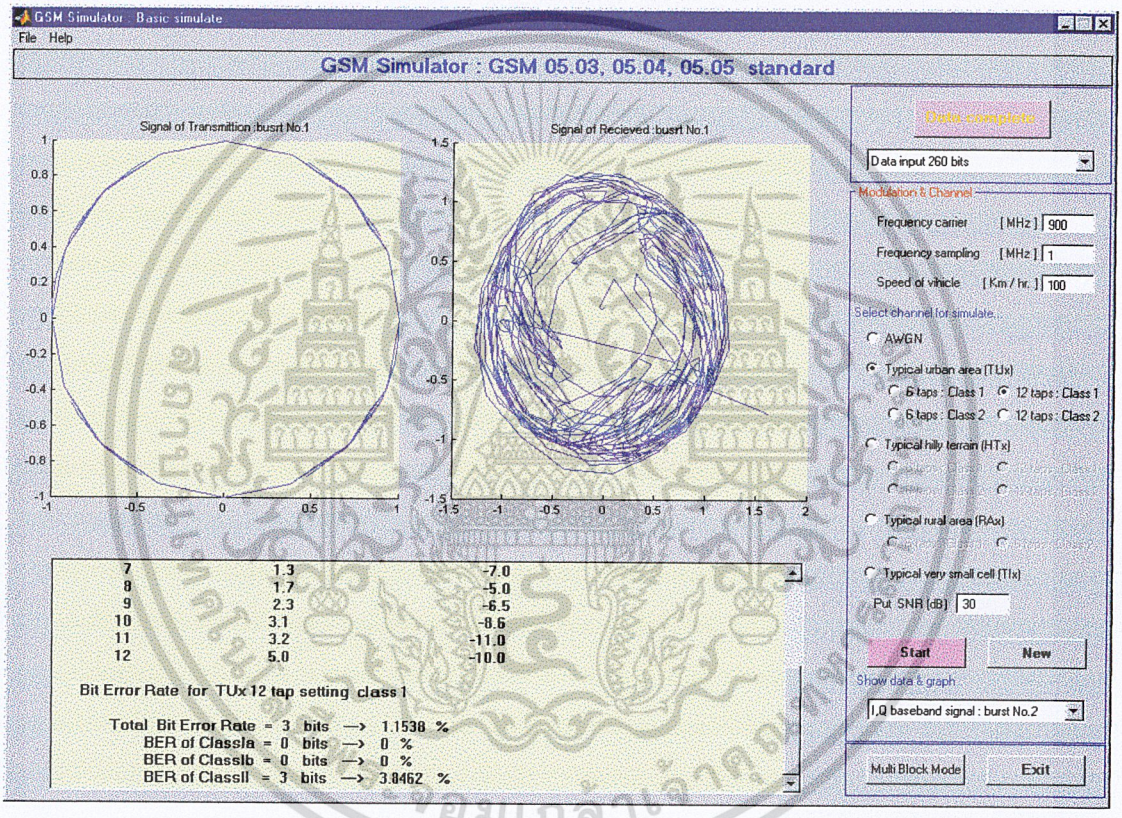


รูปที่ 4.7 กราฟและข้อมูลการผิดของบิตของ AWGN เมื่อเปลี่ยน SNR = 0 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ถ้าต้องการที่จะเลือก simulate ที่ช่องสัญญาณอื่น ๆ (TUx , HTx , RAx และ Tix) สามารถที่จะเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการและต้องทำการใส่ค่า ความถี่พาหะ (frequency carrier : fc) ความถี่แซมปลิ้ง (frequency sampling : fs) และความเร็วของยานพาหนะ (Speed of vihicle : v) ด้วย จากนั้นคลิ้กที่ปุ่ม "Start"

เช่น ถ้าเลือกช่องสัญญาณที่เป็น Tux 12 taps และ fc = 900 MHz, fs = 1 MHz , v = 100 Km/Hr และ SNR = 30 dB จะได้ BER ตามในรูปที่ 4.8

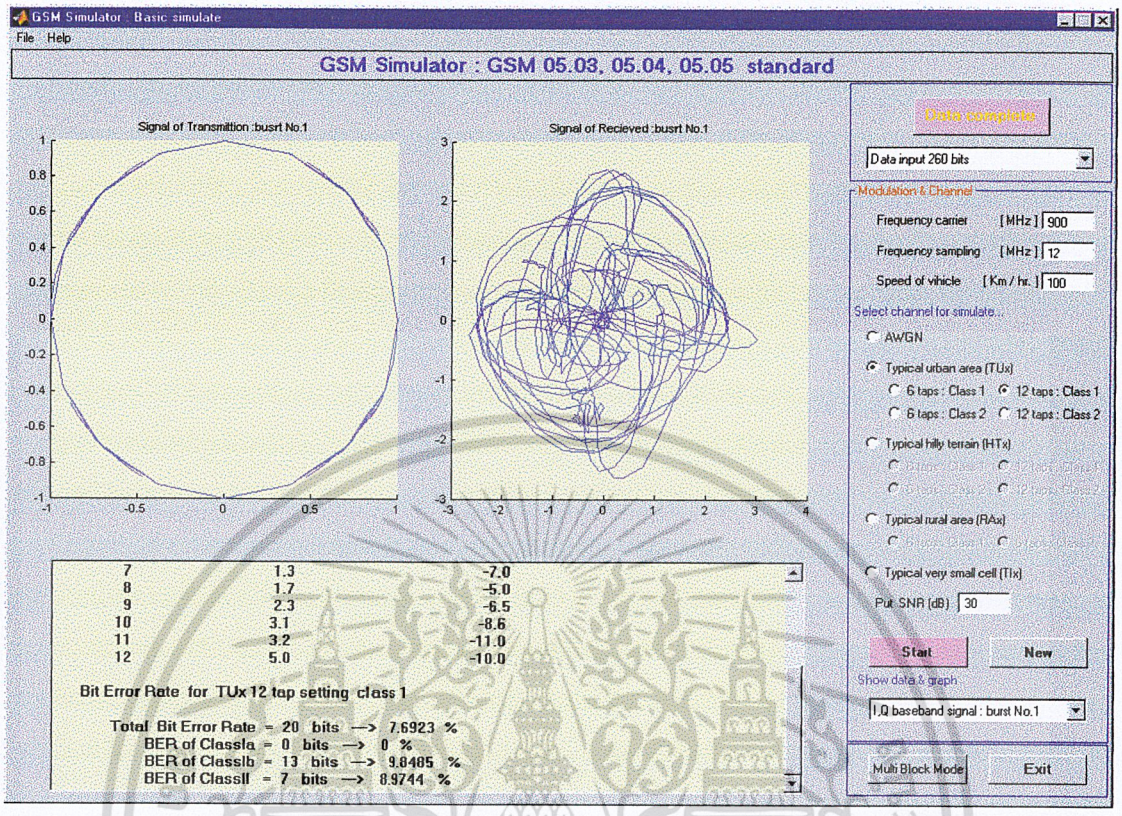


รูปที่ 4.8 ผลของ BER เมื่อใช้ช่องสัญญาณ TUx เมื่อ

fc = 900 MHz , fs = 1 MHz , v = 100 Km/Hr , SNR = 30 dB

จะเห็นว่าความเร็วของตัว MS จะมีผลทำให้เกิดค่า BER ขึ้นได้ และถ้ามีการเปลี่ยนความถี่ของการแซมปลิ้งไปที่ความถี่ที่ไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดการผิดของบิตข้อมูลได้เช่นกัน เช่น ดังแสดงในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

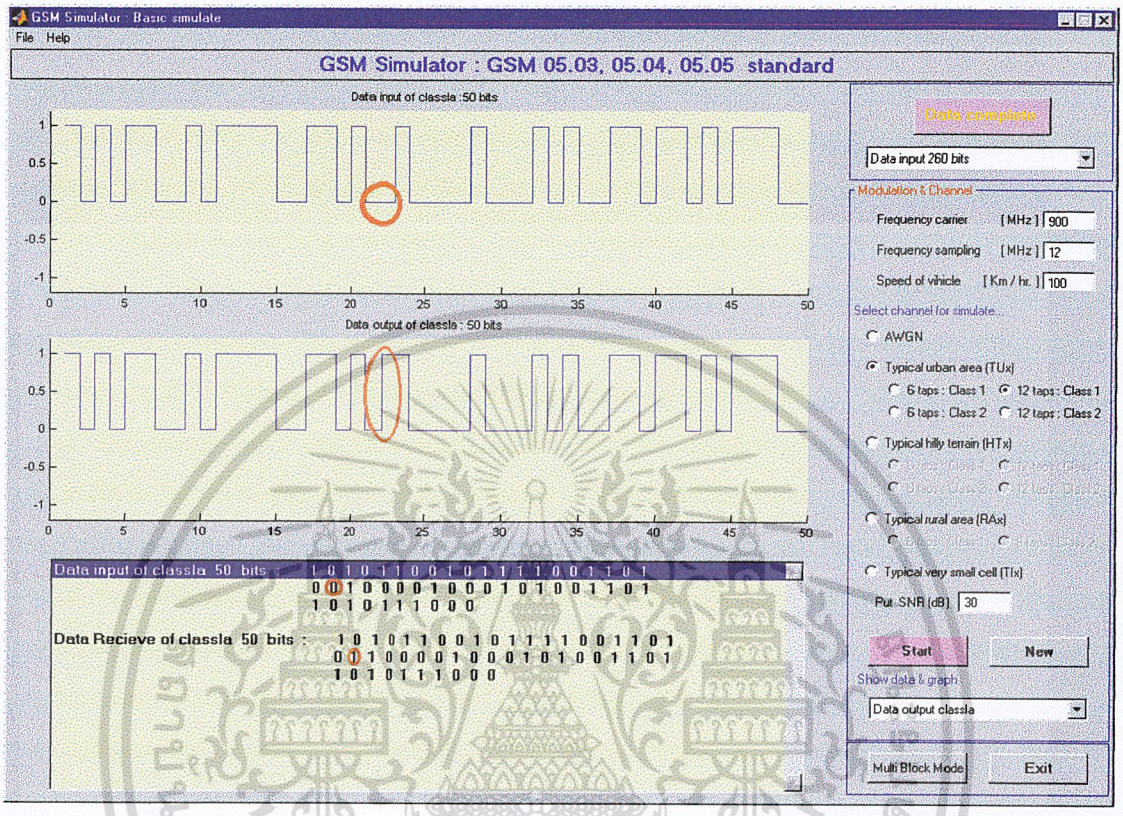


รูปที่ 4.9 ผลของ BER เมื่อใช้ช่องสัญญาณ TUx เมื่อ

fc = 900 MHz , fs = 10 MHz , v = 100 Km/Hr , SNR = 30 dB

5. เมื่อได้ผลที่ผ่านช่องสัญญาณแล้วเราสามารถดูกราฟและข้อมูลของเอาท์พุตที่ได้โดยการเลือกที่ Popup : Show data & graph ดังในรูปที่ 4.10 จะเป็นการแสดงของข้อมูลใน Class 1a เปรียบกันระหว่างอินพุตและเอาท์พุต เมื่อเลือกช่องสัญญาณที่เป็น AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลของข้อมูลใน Class 1a เมื่อใช้ช่องสัญญาณ AWGN ที่ SNR = 30 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองนั้นเราจะทำการทดสอบผลของการผิดพลาด (BER) ของข้อมูลในทั้ง 3 คลาส ในการส่งผ่านช่องสัญญาณ (channel) แต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกันอย่างไร

เริ่มจาก AWGN ในการส่งสัญญาณที่มี wgn เกิดขึ้นนั้น

- ถ้า SNR มีค่ามาก ๆ (10 dB ขึ้นไป) จะทำให้ BER มีโอกาสเกิดขึ้นน้อย ยิ่งสูงยิ่งน้อยมาก
- ที่ค่า SNR ต่ำ ๆ (0-10 dB) BER ของข้อมูลในคลาส 2 ที่ไม่มีการเข้ารหัสจะมีโอกาสผิดพลาดสูงกว่า
- แต่ถ้าค่า SNR มีค่าเป็นลบ คือมีสัญญาณรบกวนสูงกว่า จะทำให้การผิดพลาดเกิดขึ้นได้ทั้ง 3 คลาส โดยที่คลาส 1a จะมี BER มากที่สุด

ส่วนรูปแบบของช่องสัญญาณทั้ง 4 แบบ คือ TUx,HTx,RAx และ TIx ได้ผลดังนี้

- เมื่อกำหนดค่าค่าเร็วของตัว MS ไว้ที่ 0 (ไม่มีการเคลื่อนที่) สำหรับ TIx ค่า SNR จะมีผลทำให้เกิดการผิดพลาดได้เมื่อค่า SNR มีค่าประมาณ -7 dB ลงไป , RAx ประมาณ –10 dB ลงไป ส่วน TUx 6 taps จะมีผิดพลาดบ้างตั้งแต่ SNR = -12 dB และช่องสัญญาณของ TUx และ HTx 12 taps จะทนต่อสัญญาณรบกวนประมาณ –22 dB จึงจะมี BER เกิดขึ้น
- เมื่อตัว MS มีการเคลื่อนที่ การเกิดขึ้นของ BER จะมีมากเมื่อความเร็วของ MS มีการเคลื่อนที่ที่เร็ว และยิ่งค่า SNR ต่ำ ๆ จะมี BER จะยิ่งมีมากตามมา และสำหรับ TIx ความเร็วจะมีผลอย่างมาก

จากการทดลองจะเห็นว่ารูปแบบของช่องสัญญาณต่าง ๆ ที่กำหนดโดย ETSI ตามมาตรฐาน GSM 05.05 นั้น ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับผลกระทบที่เกิดขึ้นตามสภาพของสภาพแวดล้อมนั้น ๆ รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดด้วย

ผลของการทำโครงงานนี้ทำให้ทราบถึงการทำงานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM มากขึ้น โดยแพาะขั้นตอนของการทำงานของการเข้ารหัส การมอดูเลท และกระบวนการอื่นได้มากพอสมควร

จากการทำงานของโครงงาน ของโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM นี้ ซึ่งได้อ้างอิงตามมาตรฐานของ GSM 05.03 , 05.04 และ 05.05 นั้น ทางผู้จัดทำได้มีการตัดใจความสำคัญบางช่วงออกไปบ้าง หรือมีบางส่วนที่ไม่ค่อยเข้าใจ อาจจะทำให้มีการผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลง เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นได้เนื่องจากว่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้นั้นจะมีแหล่งข้อมูลที่ค่อนข้างจำกัด และส่วนใหญ่เป็นภาษาอังกฤษ อาจทำให้เรามีการแปรความหมายที่ผิดไปบางจุดบ้าง สำหรับในส่วนของการทดลองและการใช้งานของโปรแกรมจำลองการทำงาน ที่เป็น GUI นั้น ในทางผู้จัดทำเองยังไม่สามารถพัฒนาได้สมบูรณ์เท่าที่ควร เนื่องจากเวลามีค่อนข้างจำกัดและต้องเสียเวลาไปกับการอ่านวิธีการใช้งานที่เป็นภาษาอังกฤษเสียส่วนใหญ่ จึงทำให้ความสามารถบางอย่างของโปรแกรมไม่ดีเท่าที่ควร

ถ้ามีข้อมูลในปริญญานิพนธ์นี้ ผิดตก บกพร่อง ประการใด ทางผู้จัดทำขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สำหรับภาคผนวกจะเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานทั้งหมดซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ใน CD-ROM จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ

ภาคผนวก ก คือ โปรแกรม GUI สำหรับการจำลองการทำงาน

ภาคผนวก ข คือ โปรแกรม M-file ที่ใช้ในโปรแกรมจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] รศ.ดร.ถวิล พึ่งมา , "ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูล่าร์ (Cellular Mobile Telephone System) " , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2541

[2] ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ , "หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่" , สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2542

[3] อ.กฤดากร กล่อมการ , "เอกสารประกอบการเรียนวิชา Data Communication"

[4] Asha Mehrotra , "GSM System Engineering" , Artech House,Inc.

[5] Theodore S.Rappaport , "Wireless Communications Principles and Practice" , Prentice Hall PTR

[6] Stephen B.Wicker , "Error Control Systems for Digital Communication and Storage" , Prentice Hall International,Inc.

[7] Jocelyn Dobson , "Mobile Radio Environment Modelling" , Department of Electrical and Computer Engineering,University of Queensland , 1997

[8] ศ.ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์ , "วิศวกรรมการสื่อสาร (Communication Engineering)" , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พิมพ์ครั้งที่ 2 , 2542

[9] ไพโรจน์ ไววานิชกิจ , วารสารเซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ : ผ่าลึกระบบการทำงานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM / PCN , ฉบับที่ 174 – 180

[10] ETSI , "Digital cellular telecommunications system : Multiplexing and multiple access on the radio path (GSM 05.02 version 8.5.1 release 1999)"

[11] ETSI , "Digital cellular telecommunications system : Channel coding (GSM 05.03 version 8.5.1 release 1999)"

[12] ETSI , "Digital cellular telecommunications system : Modulation (GSM 05.04 version 8.1.2 release 1999)"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] ETSI , "Digital cellular telecommunications system : Modulation (GSM 05.05 version 8.5.1 release 1999)"

[14] Leon W.couch II , "Digital and Analog communication System" ,Sixth Edition, Prentice Hall

[15] Christian Schlegel , "Trellis Coding" ,IEEE(New York)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้