ปีการศึกษา 2533

การศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบการส่งสัญญาณผ่านใยแสง
ที่อัตรา 8 เมกกะบิทต่อวินาที

โดย

นาย กิตติ วิไลเวทวิทยากร 301015
นาย เกื้อศักดิ์ ถาวรอยู่ 301028

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. กอบชัย เตชหาญ
ผศ. ถวิล กิ่งทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(02797)

18 ก.ค. 2534

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2533

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบการส่งสัญญาณผ่านใยแสงที่อัตรา 8 เมกกะบิทต่อวินาที

ผู้จัดทำ

1. กิตติ วิไลเวทวิทยากร 301015
2. เกื้อศักดิ์ ถาวรอยู่ 301028

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร. กอบชัย เดชหาญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ถวิล กิ่งทอง)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่ T 33142 ก3

เลขทะเบียน 027995

วัน, เดือน, ปี 15 ส.ค. 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027995

การศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบการส่งสัญญาณผ่านใยแสงที่อัตรา 8 เมกกะบิทต่อวินาที

กิตติ วิไลเวทวิทยากร 301015
เกื้อศักดิ์ ถาวรอยู่ 301028
ผศ. ดร. กอบชัย เดชทาญ
ผศ. ถวิล กิ่งทอง
ปีการศึกษา 2533

บทคัดย่อ

ระบบการสื่อสารด้วยใยแสงเริ่มทวีความสำคัญ เนื่องจากประสิทธิภาพดีกว่าในระบบอื่นๆ รวมถึงในปัจจุบันระบบสื่อสารแบบดิจิตอลเข้ามาแทนที่การสื่อสารแบบอนาลอก ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อระบบการส่งสัญญาณแบบดิจิตอลผ่านใยแสงที่อัตรา 8 เมกกะบิทต่อวินาที ระบบที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นระบบที่มีอยู่แล้วและติดตั้งอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม และสัญญาณรบกวนถูกนำมาศึกษาจะเป็นสัญญาณรบกวนชนิดการสุ่มเทียมแบบลำดับและจากชีเนอร์ไดโอด

การศึกษานี้เพื่อดูผลกระทบสัญญาณรบกวนแบบดิจิตอลและอนาลอกที่เข้ามามีผลกับการส่งสัญญาณแบบดิจิตอล นอกจากนี้ในปริญญานิพนธ์นี้เสนอข้อสรุปและคุณสมบัติตลอดจนการวัดอัตราความผิดพลาดข้อมูล ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาการส่งสัญญาณของข้อมูลแบบดิจิตอลผ่านระบบส่งสัญญาณแบบใยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Noise effects in 8 Mbits/s optical fiber transmission system

Kitti Wilaiwetwithayakorn No. 301015

Kruesak Thavornyu No. 301028

Assistant Professor Dr. Kobchai Dejhan Advisor

Assistant Professor Thawil Kingtong Advisor

Abstract

The optical communication acts as a vital role because of the better efficientcy than the other systems. At present, the digital communication take part in the communication system. This thesis deals with the studies of the effects dued to the noise signal with give some actions in digital signal transmission via optical fiber at 8 Mbits/second. The studied system is installed at the Telecommunications Engineering Department , and the determined noise signals are pseudo-random noise and shot noise (from zener diode). The objective of this study is to observe the effects of digital and analog noise signal which effect to the digital signal transmission. The thesis also presents the characteristics, conclusion and bit error rate of data that will be useful. The studies of the digital signal and/or data transmission by using optical fiber transmission system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีของระบบการสื่อสารแบบเชิงเลข	2
2.1 การเปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นดิจิตอล	2
2.2 การมัลติเพล็กซ์	10
2.3 การส่ง	13
2.4 การซิงโครไนเซชั่น	15
2.5 การตัดสินหาความผิดพลาดในระบบ PCM	17
2.6 การหาความสัมพันธ์กับแมทช์ฟิลเตอร์ริ่ง	23
2.7 การตรวจหาความผิดพลาดและแก้ไข	27
2.8 ทฤษฎีการตัดสินทางสถิติ	39
บทที่ 3 ระบบที่ใช้ในการทดลอง	46
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	52
4.1 วัตถุประสงค์	52
4.2 เครื่องและอุปกรณ์	52
4.3 ขั้นตอนการทดลอง	52
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	60
ภาคผนวก	61
กิตติกรรมประกาศ	68
หนังสืออ้างอิง	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การพัฒนาระบบสื่อสารข้อมูลในปัจจุบัน จะมุ่งเน้นพัฒนาระบบการสื่อสารแบบเชิงเลขให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด โดยใช้ต้นทุนที่ต่ำที่สุดโดยยิ่งนานวัน ระบบการสื่อสารจะยิ่งมีความสลับซับซ้อนในการทำงาน มากยิ่งขึ้นและในการใช้งานจะต้องให้ข่าวสารข้อมูลที่ส่งและรับ จะต้องคงสภาพความถูกต้องของข่าวสารไม่ให้มีความผิดพลาดเกิดขึ้นหรือให้ผิดพลาดน้อยที่สุด อีกทั้งยังสามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งแก้ไขให้ถูกต้องได้ด้วยซึ่งในการใช้งานจริงของระบบสื่อสาร จะมีการรบกวนจากสัญญาณที่ไม่ต้องการมีผลทำให้ข่าวสารข้อมูลที่ผ่านระบบสื่อสารเกิดการผิดพลาดได้ ดังนั้นการศึกษาลักษณะต่างๆของสัญญาณรบกวน ที่มีผลต่อระบบสื่อสารจึงมีความจำเป็นเพื่อการพัฒนาอุปกรณ์ใน การสื่อสาร รวมทั้งเพื่อป้องกันและควบคุมสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นนั้นให้มีผลต่อระบบการสื่อสารน้อยที่สุด

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงลักษณะสัญญาณรบกวนต่างๆที่มีผลต่อระบบการสื่อสารแบบเชิงเลข โดยเริ่มด้วยการอธิบายระบบสื่อสารแบบเชิงเลขต่อด้วยสัญญาณรบกวน และทำการทดลองสร้างสัญญาณรบกวนเพื่อนำมาทดลองแทรกเข้าไปในระบบสื่อสาร โดยสัญญาณที่ใช้ทดลองเป็นแบบ HDB-3 และระบบที่ใช้จะเป็น 8 Mbit/sec FIBER OPTICS TRANSMISSION SYSTEM และยังแนะนำโอกาสต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการผิดพลาดของข้อมูลขึ้นในระบบแต่ละส่วน แนวทางวิเคราะห์และแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาด โดยได้แนะนำรหัสแฮมม์มิ่ง(HAMMING CODE)ในการตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น จะมีทั้งแบบมีคาบ(PERIODIC)และแบบไม่มีคาบ(NONPERIODIC)ซึ่งอาจจะพิจารณาได้เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบคือ ระบบสร้างขึ้นมาเองและสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากนอกระบบคือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนอกระบบและเข้ามารบกวนระบบ และในการวิเคราะห์สัญญาณที่เครื่องรับสัญญาณที่เครื่องรับ รับเข้ามานั้นจะถูกเครื่องรับตัดสินว่าสัญญาณนั้นเป็นสัญญาณแทนรหัส 0 หรือรหัส 1 ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อการผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีของระบบการสื่อสารแบบเชิงเลข

การสื่อสารระบบนี้ได้ใช้สัญญาณเชิงเลขในการส่งข่าวสารข้อมูลแทนการสื่อสารแบบเดิมที่ใช้สัญญาณเสียงเพียงอย่างเดียว

ระบบการส่งแบบเชิงเลข (DIGITAL TRANSMISSION) แบ่งได้เป็น 4 ส่วนคือ

1. การเปลี่ยนสัญญาณจากเสียงเป็นสัญญาณเชิงเลข ประกอบไปด้วย
   - การสุ่มตัวอย่าง (SAMPLING)
   - การจัดระดับสัญญาณ (QUANTIZING)
   - การเข้ารหัส (CODING)
2. การมัลติเพล็กซ์ (MULTIPLEX)
3. การส่ง (TRANSMISSION)
4. การซิงโครไนเซชั่น (SYNCHRONIZATION)

2.1 การเปลี่ยนสัญญาณจากเสียงเป็นสัญญาณเชิงเลข

2.1.1 การสุ่มตัวอย่าง (SAMPLING)

เป็นการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเสียงต่อเนื่อง(ANALOG) โดยตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มจะเป็นสัญญาณตัวแทนที่ใช้ในการส่งสื่อสารแทนสัญญาณจริงทั้งหมด หลักการคือสัญญาณข่าวสารควรจะถูกสุ่มด้วยความถี่เป็นมากกว่าหรือเท่ากับ 2 f_t ครั้งต่อวินาทีเมื่อสัญญาณข่าวสารมีช่วงความถี่จำกัดสูงสุดที่ f_t Hz

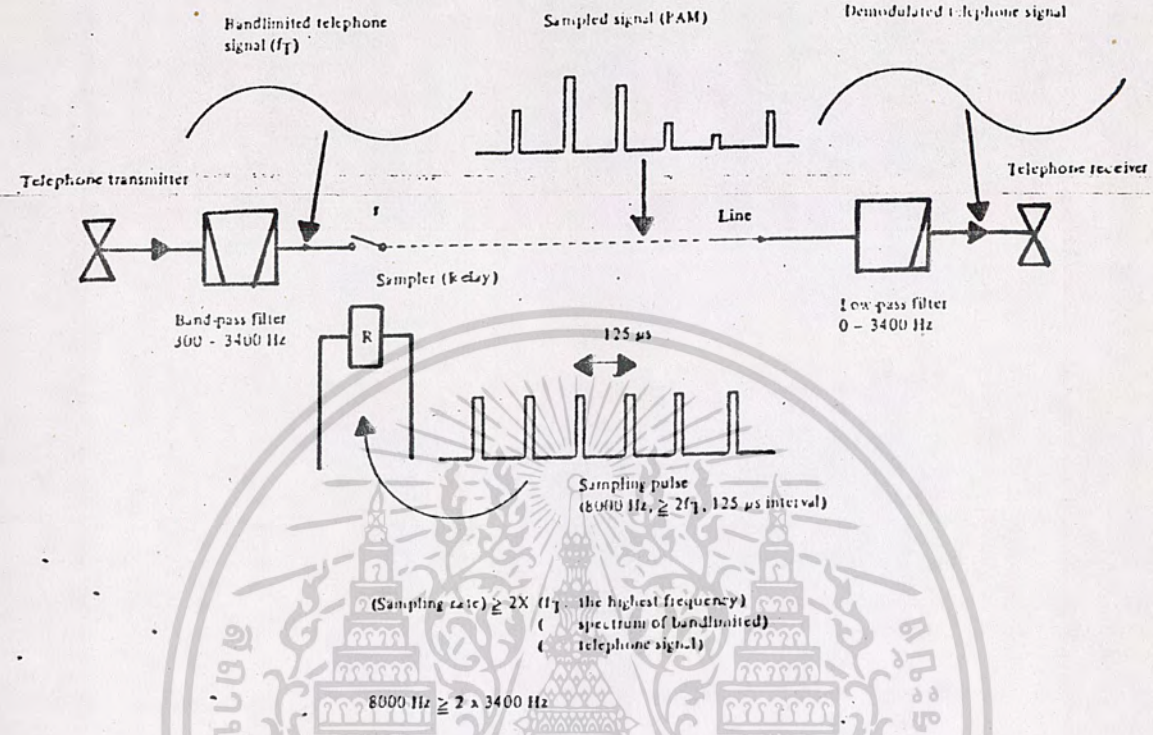
$$f \geq 2 f_t$$

f : ความถี่ของการสุ่ม

f_t : ความถี่จำกัดสูงสุดของแบนด์วิท(BANDWIDTH)

สำหรับการสื่อสารที่ใช้โทรศัพท์มีช่วงความถี่ระหว่าง 300 และ 3400 Hz อัตราการสุ่มควรจะเป็น 8000 Hz หรือ 1 ครั้งต่อ 125 ไมโครวินาที ซึ่งอัตราสุ่มนี้เป็นคำแนะนำของ CCITT ที่ G711

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



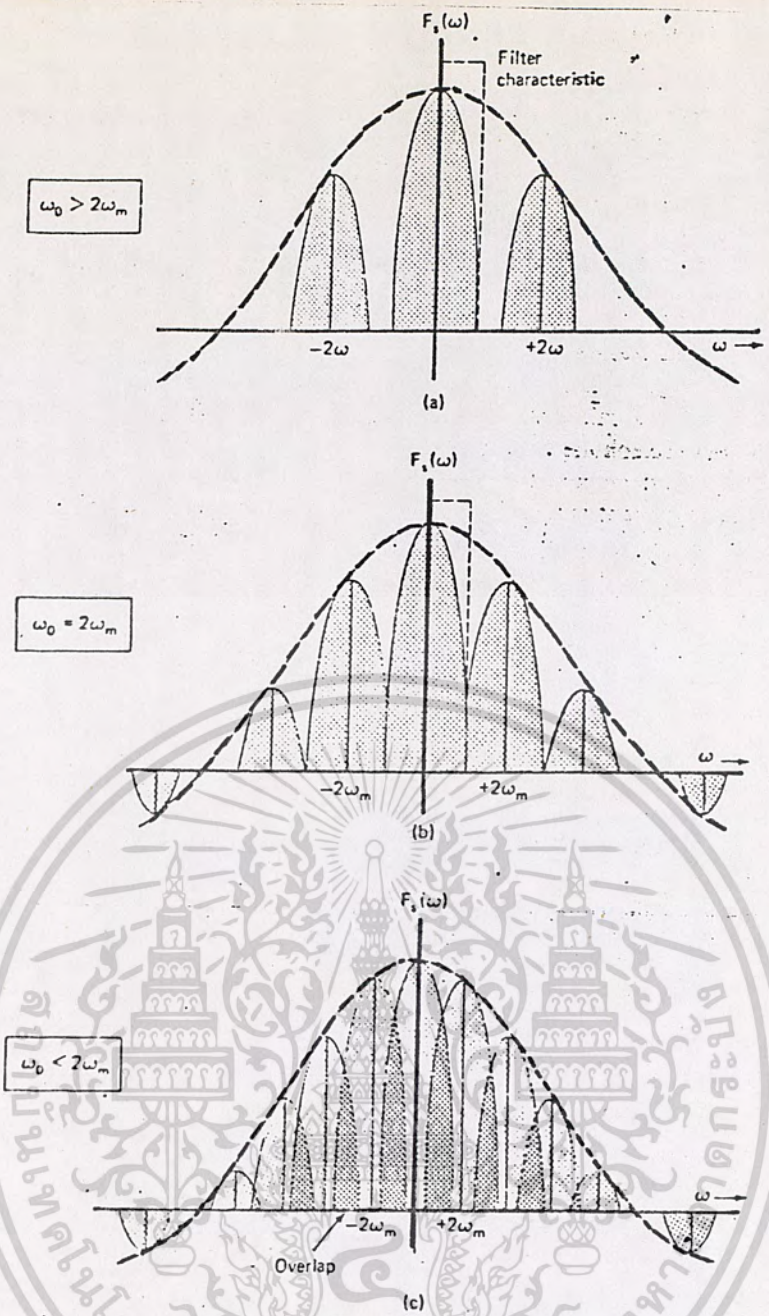
รูปที่ 1 หลักการสุ่มตัวอย่าง

สมมุติว่าถ้าความถี่ที่ใช้ในการสุ่มน้อยกว่า $2f_T$ Hz จะทำให้สัญญาณที่ได้มีการรบกวนซึ่งกันและกัน จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนไม่สามารถรักษาลักษณะข่าวสารข้อมูลเดิมที่ต้องการส่งได้ ดังรูปที่ 2

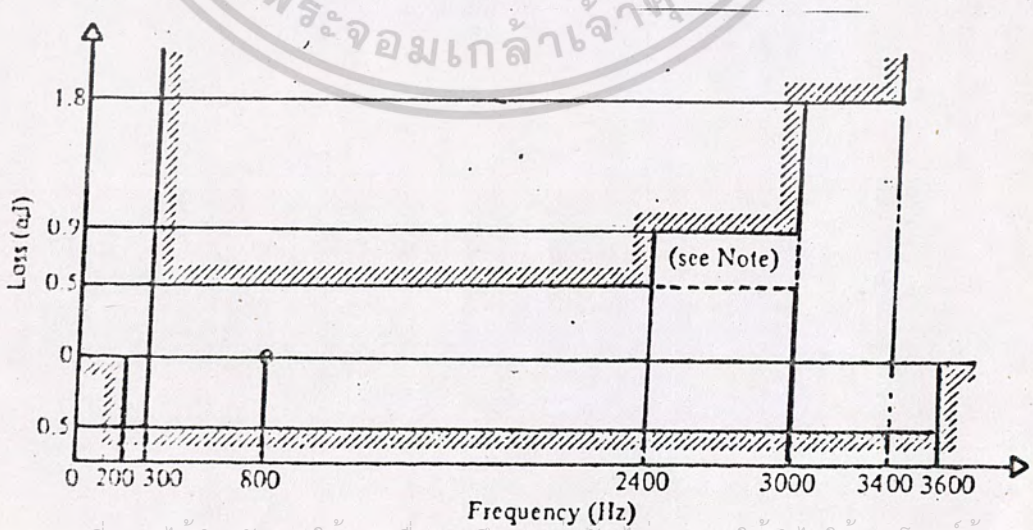
สัญญาณที่ถูกสุ่มนั้นสามารถที่นำกลับมาสู่สัญญาณดังเดิมก่อนการสุ่มได้โดยวิธีผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) ดังรูปที่ 1

ความผิดเพี้ยนของความถี่ทั้งหมดที่เกิดจากวงจรแถบความถี่ผ่าน (BAND-PASS FILTER) ในอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุปกรณ์การรับจะต้องทำตามคำแนะนำของ CCITT ที่ G712 ดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 สเป็คตรัมของการสุ่มตัวอย่างสัญญาณที่อัตราเร็วแตกต่างกัน



รูปที่ 3 ความผิดเพี้ยนของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

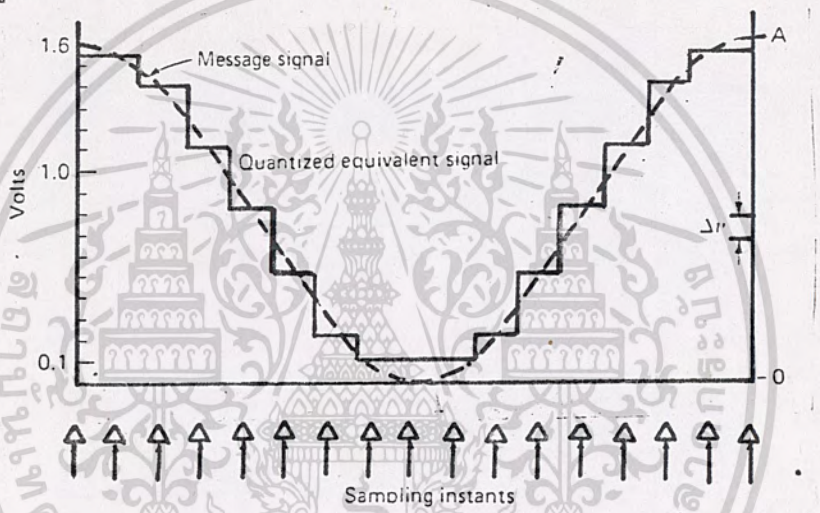
2.1.2 การจัดระดับสัญญาณที่ได้จากการสุ่ม (QUANTIZING)

คือการจัดระดับขนาดของสัญญาณตัวอย่าง(SAMPLE) ให้มีขนาดเท่ากับขนาดที่ถูกกำหนดขึ้นอย่างแน่นอน เพื่อง่ายต่อการเข้ารหัส (CODING) สัญญาณนั้น ๆ

การจัดระดับแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

2.1.2.1 แบบยูนิฟอร์ม (UNIFORM)

การจัดระดับแบบนี้ช่วงห่างของลำดับขนาดที่ถูกกำหนดนั้น มีค่าคงที่ (AV) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การจัดระดับแบบยูนิฟอร์ม

2.1.2.2 แบบไม่ยูนิฟอร์ม (NONUNIFORM)

วิธีนี้จะใช้การกดและขยายออก (COMPRESSION AND EXPANSION) สัญญาณก่อนที่จะเข้าขบวนการจัดระดับ (QUANTIZING) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อความผิดพลาดจากการจัดระดับ(QUANTIZING) ของขนาดเล็ก ๆ ของสัญญาณสุ่มตัวอย่าง โดยการทำด้วยวิธีนี้ความผิดพลาดที่เกิดจากการจัดระดับจะลดน้อยลง

CCITT แนะนำให้ใช้การกดแบบ A-LAW สำหรับระบบ 30 ช่องสัญญาณ (คำแนะนำที่ G732) และแบบ μ -LAW สำหรับระบบ 24 ช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบ μ -LAW

คือจะมีคุณสมบัติดังสมการที่ปรากฏ และดังรูปที่ 5

$$Vc = \frac{A \, Log[1+\mu \, Vi/a]}{Log\,[1+\mu\,]} \qquad 0 \leq Vi \leq A$$

$$Vc = \frac{-A \, Log\,[\,1-\mu \, Vi/a]}{Log\,[\,1+\mu\,]} \qquad -A \leq Vi \leq 0$$

เมื่อ Vi = ขนาดสัญญาณเข้า (โวลท์)

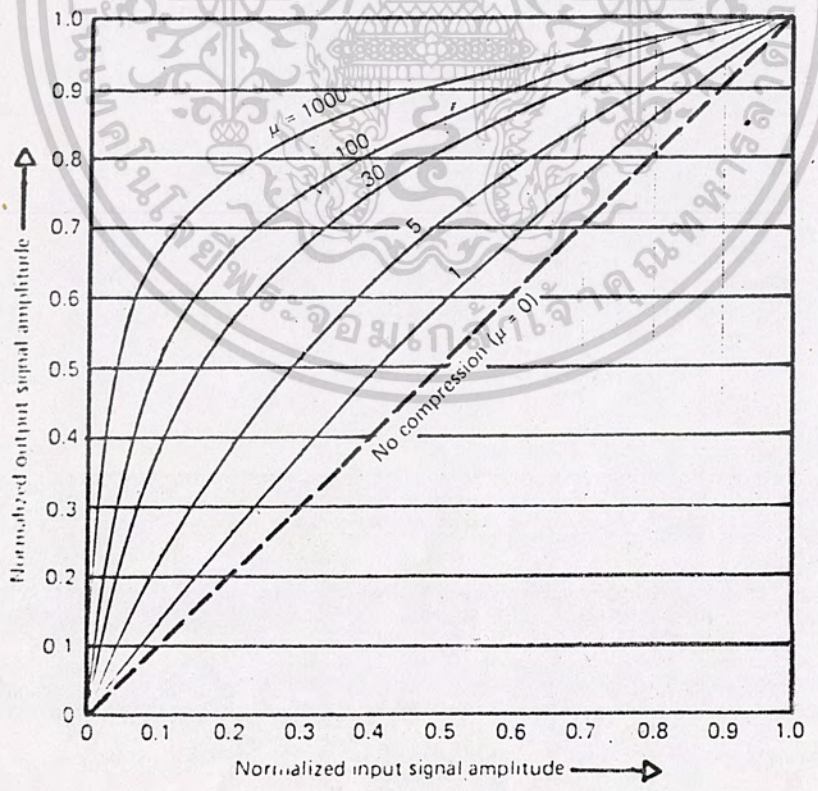
Vc = ขนาดสัญญาณที่ถูกกด (โวลท์)

- แบบ A-LAW

คือมีคุณสมบัติดังสมการต่อไปนี้ และดังรูปที่ 6

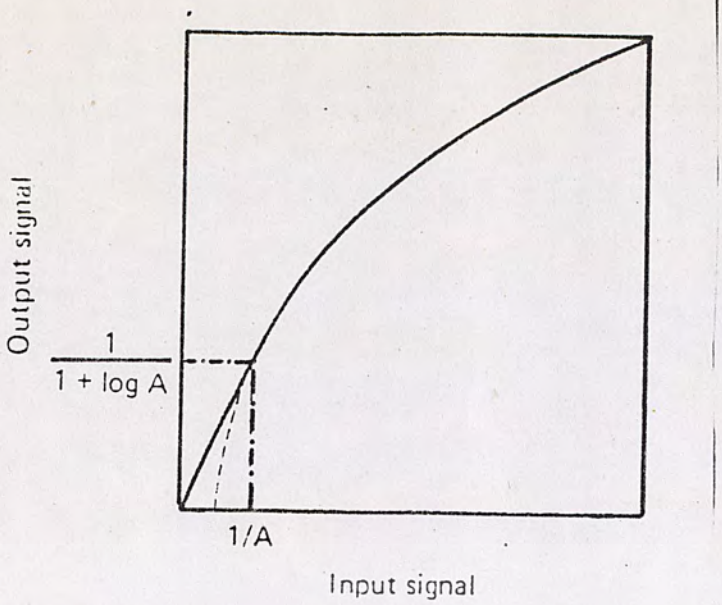
$$Vc = \frac{A \, Vi}{1+Log A} \qquad 0 \leq Vi \leq \frac{1}{A}$$

$$Vc = \frac{1+Log[AVi]}{1+Log A} \qquad \frac{1}{A} \leq Vi \leq 1$$



รูปที่ 5 μ -LAW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 A -LAW

2.1.3 การเข้ารหัส (CODING)

คือขบวนการกำหนดรหัสของขนาดสัญญาณที่ได้จากขบวนการจัดระดับสัญญาณที่เสร็จแล้ว ซึ่งขนาดจะถูกแทนด้วยรหัสเลขฐานสอง (BINARY) เช่น ขนาด 3 จะถูกแทนด้วยรหัส 011 ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่าการมอดูเลทชั่นแบบรหัส(PULSE CODE MODULATION)

จากรูปที่ 7 แสดงถึง ตัวอย่างการเข้ารหัสของสัญญาณจำนวน 4 บิท ที่จะทำการเปลี่ยนขนาดของแต่ละสัญญาณที่ได้จากการสุ่มไปเป็นรหัสสัญญาณเชิงเลข ครั้งแรกสวิท S_1 จะถูกปิดอยู่และเมื่อกระแสที่เข้า I_1 กับกระแสอ้างอิง I_{Ref} จะทำการเปรียบเทียบกันในวงจรเปรียบเทียบ (COMPARISION CIRCUIT) ถ้า I_1 มีขนาดเล็กกว่า I_{Ref} S_1 จะเปิด นอกนั้น S_1 จะปิดต่อไป S_1 จะถูกปิด และขบวนการจะทำซ้ำแต่ละขั้นตอนจนถึง S_4

จากรูปที่8 ขนาดของสัญญาณสุ่มที่ถูกเข้ารหัสจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 16 เพราะว่า ขั้นที่เล็กที่สุดของรหัสไบนรี่คือ 1 และขนาดของสัญญาณสุ่มควรถูกแบ่งเป็นค่าตัดสินที่ใกล้เคียงกัน เพื่อป้องกันการผิดพลาดซึ่งเกิดจากการเข้ารหัส

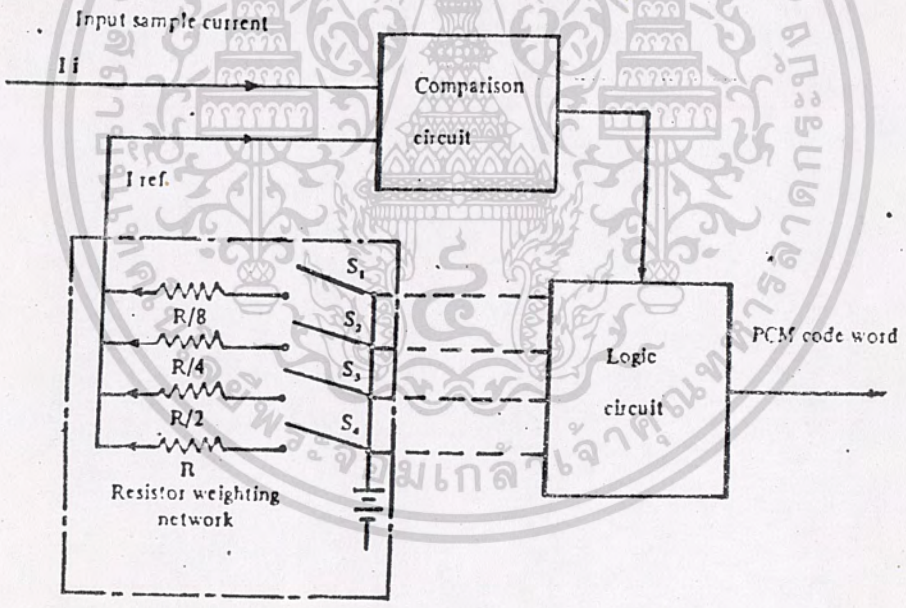
เพื่อที่ทำการสร้างสัญญาณให้กลับมาเหมือนเดิมจากสัญญาณรหัสเชิงเลขเราจะใช้ตัวถอดรหัสเป็นตัวถอดรหัสสัญญาณเชิงเลขที่เข้ามา

ค่าแนะนำ CCITT ที่ G711 ให้ใช้เลขไบนารี่จำนวน 8 บิท แทนขนาดสัญญาณ สุ่ม (SAMPLE SIGNAL) ต่อ 1 สัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

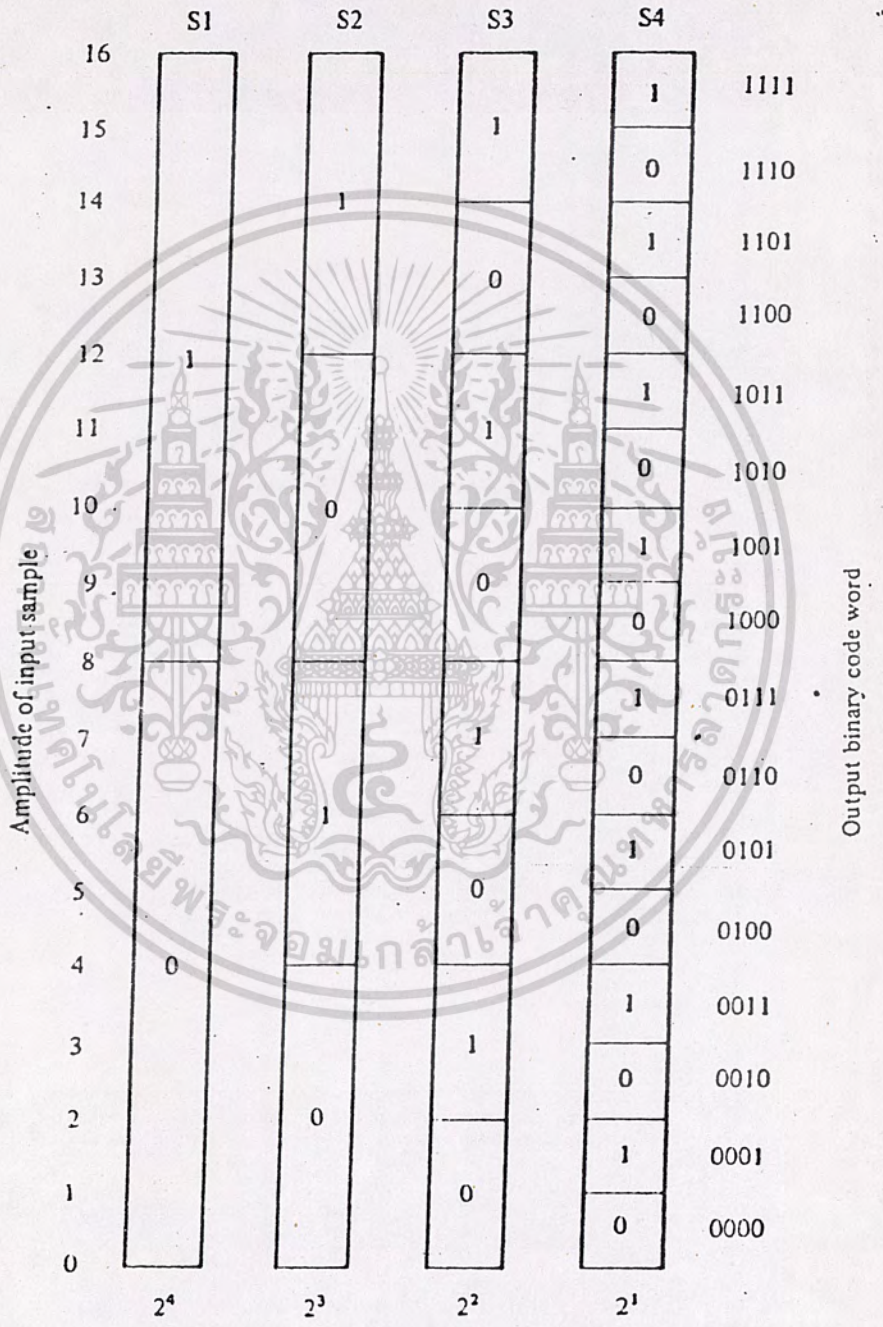
ชนิดของรหัสที่ใช้ในการสื่อสารมีหลายชนิด ดังนั้น การเลือกใช้ชนิดใดชนิดหนึ่ง ต้องมีการพิจารณาคุณสมบัติเหมาะกับการส่งชนิดนั้น ๆ หรือไม่ ตัวอย่างสัญญาณรหัส
ดังรูปที่ 9

- NON RETURN TO ZERO
- RETURN TO ZERO
- BIPHASE
- DELAY MODULATION
- MULTILEVEL BINARY



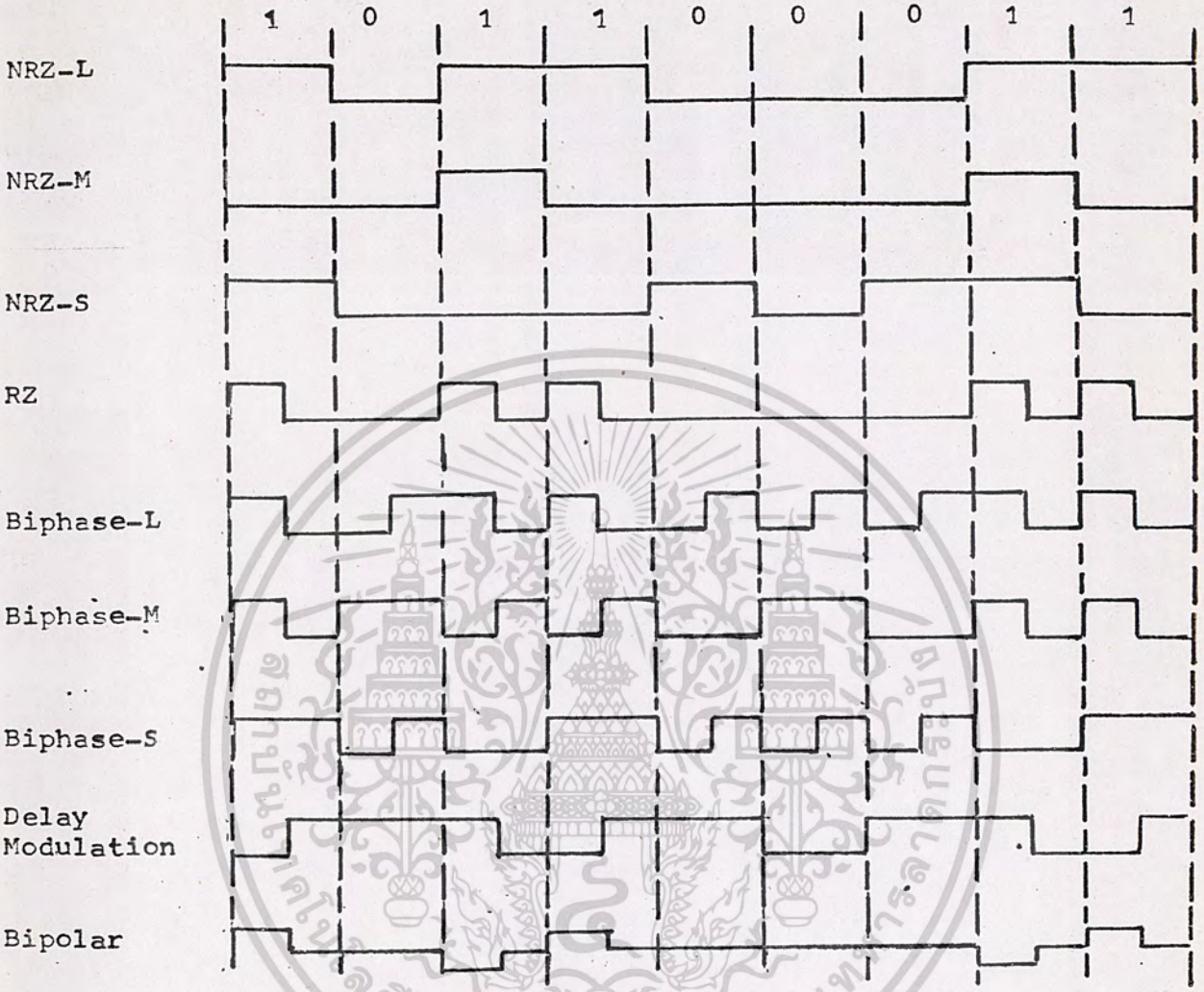
รูปที่ 7 ตัวอย่างการเข้ารหัส 4 บิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ขนาดของสัญญาณสุ่มที่ถูกเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
027975



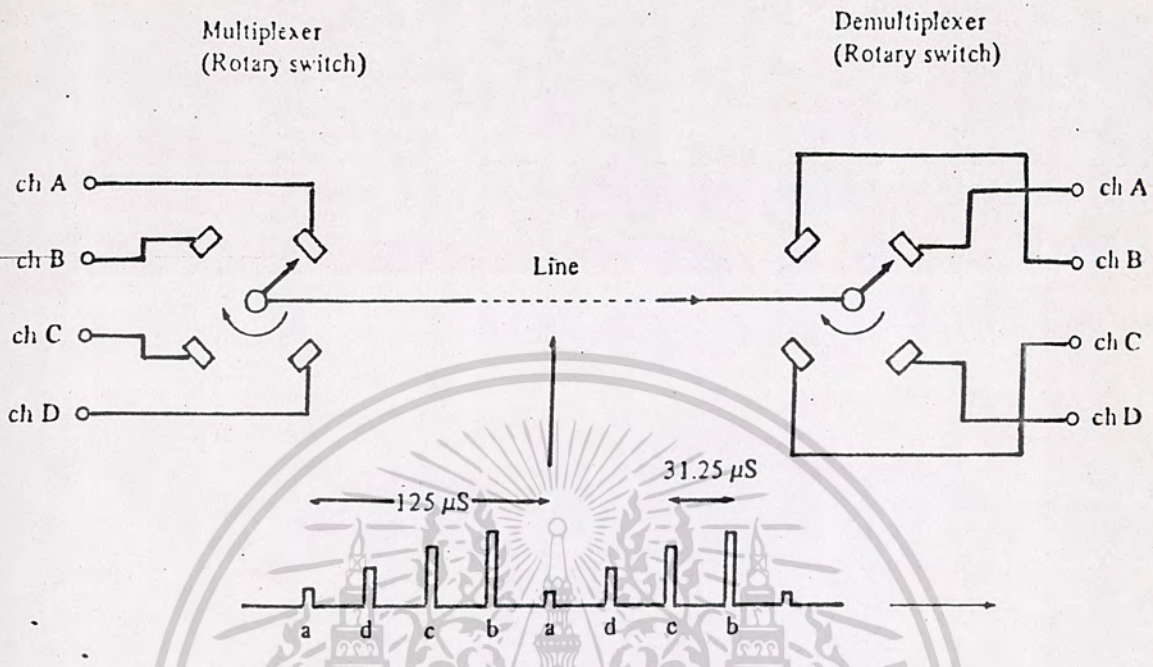
รูปที่ 9 ตัวอย่างสัญญาณรหัส

2.2. <u>การมัลติเพล็กซ์</u> (MULTIPLEX)

คือ ขบวนการรวมสัญญาณหลาย ๆ ช่องสัญญาณให้เป็นหนึ่งช่องสัญญาณ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ

ในการส่งแบบระบบเชิงเลขนี้ จะใช้การมัลติเพล็กซ์ โดยวิธีแบ่งช่วงเวลา (TIME-DIVISION MULTIPLEX) เพื่อการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพ และประหยัด, ในตัวกลางสื่อสารอันเดียวกัน เช่น สายโคแอคเชี่ยน, สายเส้นใยแสงจะถูกแบ่งเฉลี่ยการใช้สายโดยวิธีการรวมหลาย ๆ สัญญาณเข้าด้วยกันดังรูปที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 การมัลติเพล็กซ์แบบ TDM

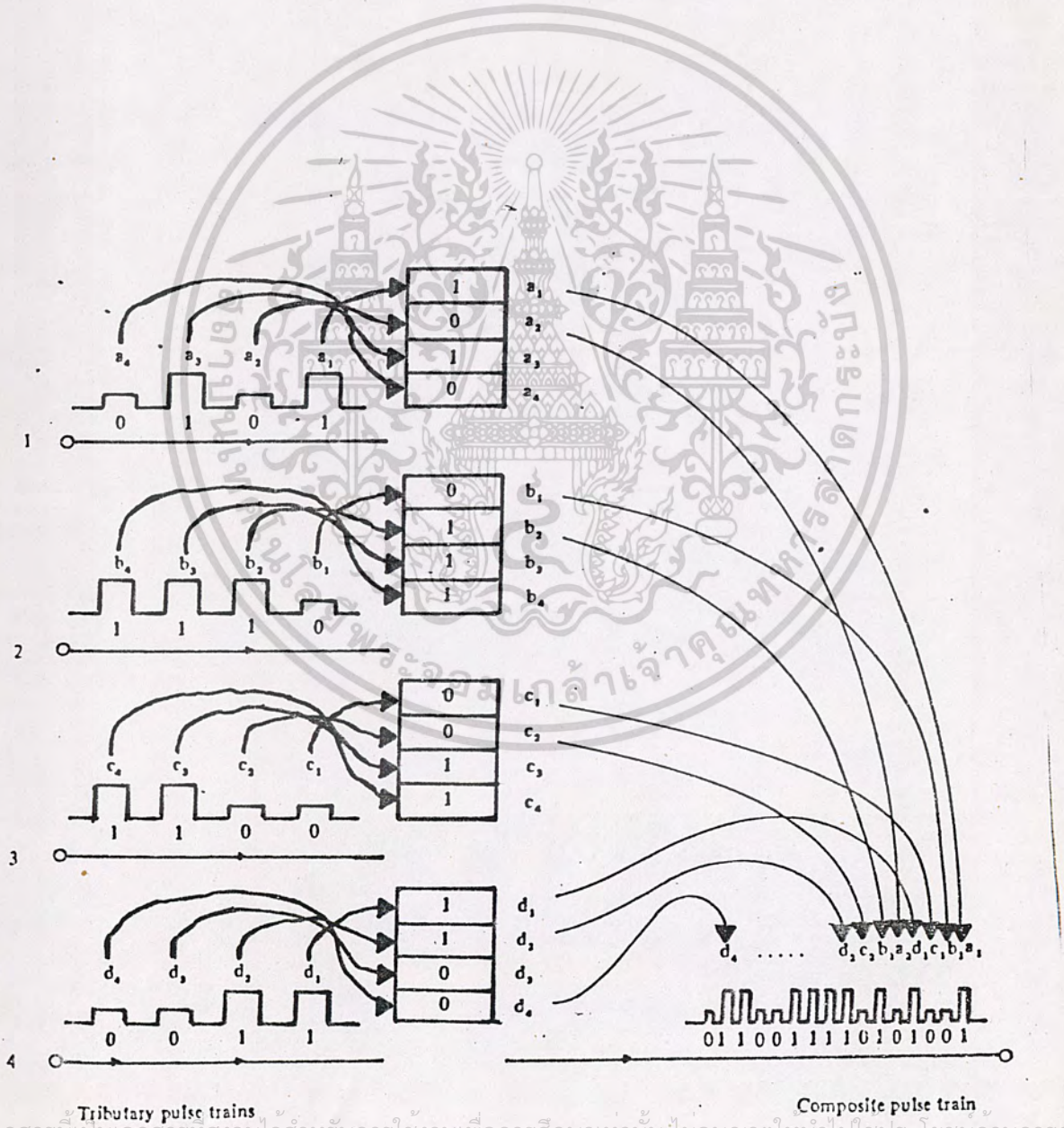
หลักการรวมสัญญาณโดยวิธีแบ่งช่วงเวลา(TIME-DIVISION MULTIPLEX) ตัวกลางที่ใช้ในการสื่อสารจะถูกใช้เป็น 4 ช่องสัญญาณ โดยจะมีสวิทที่หมุนได้เป็นตัวสัมผัสแต่ละช่องสัญญาณ สวิททั้งสองตัวจะต้องหมุนไปด้วยความเร็วพร้อมกัน (SYNCHRONOUS) ดังนั้นจากรูปเราก็จะได้ทั้งการสุ่มสัญญาณและการรวมสัญญาณแบบแบ่งช่วงเวลาไปพร้อม ๆ กันด้วย

ความเร็วในการหมุนสวิทควรมีอัตราเท่ากับ 8,000 ครั้ง ต่อ 1 วินาที และช่วงห่างระหว่างพัลซ์สัญญาณ (PULSE) ของสัญญาณ (a) จากรูปควรเท่ากับ 125 ไมโครวินาที และช่วงห่างระหว่าง พัลซ์ที่ถูกการรวมสัญญาณ (MULTIPLEX) a-b, b-c, c-d, d-a ควรเท่ากับ 31.25 ไมโครวินาที

เทคนิคการรวมสัญญาณเชิงเลข (DIGITAL MULTIPLEX TECHNIQUES) นั้นจะเป็นการรวมแบบแบ่งช่วงเวลาของ 2 หรือมากกว่า 4 สัญญาณเชิงเลข โดยรวมเป็นเพียงสัญญาณเชิงเลขเพียงสัญญาณเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการรวมสัญญาณเชิงเลข (DIGITAL MULTIPLEX) สัญญาณเชิงเลขจะต้อง ถูกบันทึกลงในหน่วยความจำทีละตัวก่อนที่ ที่จะมีการรวมสัญญาณเชิงเลขเข้าด้วยกันดังรูปที่ 11 สัญญาณที่ถูกบันทึกในหน่วยความจำนั้นก็จะถูกอ่านออกมาและทำการส่งสัญญาณนั้นออกไปเป็นสัญญาณเชิงเลขประกอบเพียงสัญญาณเดียวด้วยอัตราเร็วประมาณ 4 เท่า ของความเร็วของสัญญาณเดิมก่อนการรวม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

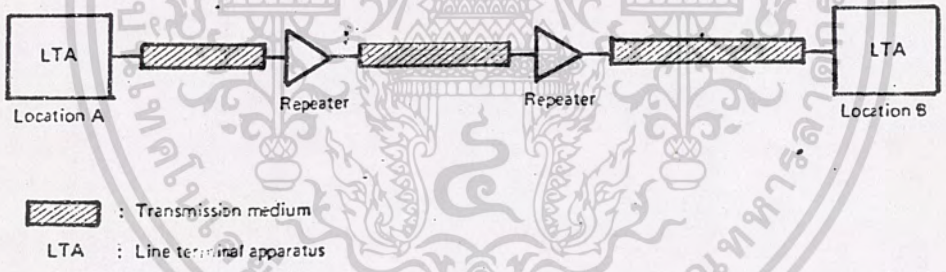
รูปที่ 11 ดิจิตอล มัลติเพล็กซ์

2.3. <u>การส่งสัญญาณในระบบแบบเชิงเลข</u> (DIGITAL TRANSMISSION)

ในระบบส่งสัญญาณ จากต้นทางไปยังปลายทางนั้น สามารถจะแบ่งเป็นส่วน ๆ ได้ ดังนี้

- อุปกรณ์ปลายทางทางด้านสาย(LINE TERMINAL APPARATUS)
- ตัวทวนสัญญาณ (REPEATER)
- สายส่ง (TRANSMISSION MEDIUM)

ในการออกแบบระบบส่ง-รับ มีความจำเป็น อย่างมาก ในการพิจารณาคุณสมบัติของสายส่ง เพราะเป็นตัวกำหนดการลดคุณภาพสัญญาณ เช่น ความสูญเสีย , ความคลาดเคลื่อนของเฟส เป็นต้น



รูปที่ 12 การส่งสัญญาณจากต้นทางถึงปลายทาง

สายเคเบิลที่ใช้ในระบบเชิงเลข(DIGITAL TRANSMISSION CALBE MEDIA) มีด้วยกัน 3 ชนิด ที่ใช้ในระบบสื่อสารทางเชิงเลข

1)สายเคเบิ้ลคู่สมมาตร(SYMMETRICAL PAIR CABLE)

เป็นสายเคเบิลพื้นฐานที่ใช้กัน สายเคเบิ้ลชนิดนี้สามารถที่จะถูกใช้ในการส่งสัญญาณเชิงเลขในอัตรา 1,544 เมกกะบิท/วินาที , 2,048 เมกกะบิท/วินาที และอื่น ๆ อัตราเร็วสูงสุดในการส่งที่สามารถใช้กับสายเคเบิลชนิดนี้ได้มีค่าประมาณ 8,000 เมกกะบิท/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2)สายเคเบิ้ลเส้นใยแสง(OPTICAL FIBER CABLE)

เป็นสายเคเบิลชนิดทันสมัยที่สุด คุณสมบัติของสายชนิดนี้คือ

- ค่าความสูญเสียน้อยสามารถที่ยืดระยะทางของสถานีทวนสัญญาณ (REPEATER) ออกไปได้
- มีช่วงความถี่(BAND WIDTH)กว้างมาก
- ราคาวัสดุที่ทำมีค่าต่ำ
- ป้องกันการแทรกสอดและถูกรบกวนจากสัญญาณอื่น ๆ

นอกจากนี้สายเคเบิ้ลมีน้ำหนักเบาและยืดหยุ่นง่าย สายเคเบิ้ลชนิดนี้แบ่งได้เป็น2พวกใหญ่ ๆ คือ แบบมัลติโมด(MULTIMODE) และแบบซิงเกิ้ลโมด(SINGLEMODE)แบบมัลติโมด
ยังถูกแยกเป็น2ชนิด คือ

1.ดัชนีหักเหของแสงแบบขั้น(STEP INDEX)

2.ดัชนีหักเหแบบเกรดเต็ดอินเด็ก(GRADED INDEX)

สายเคเบิลแบบมัลติโมด เหมาะกับการส่งในระยะสั้น ๆ อัตราการส่งต่ำส่วนแบบซิงเกิ้ลโมดเหมาะกับการส่งในระยะทางไกล และมีอัตราเร็วของสัญญาณที่ส่งสูง

3)สายเคเบิ้ลโคแอกเชี่ยน(COAXIAL PAIR CABLE)

สายเคเบิลชนิดนี้สามารถถูกใช้ในการส่งสัญญาณเชิงเลขที่อัตราเร็วเท่ากับ 100, 140, 270, 400, 565 เมกกะบิท/วินาที อัตราเร็วสูงสุดที่สามารถใช้สายนี้ส่งได้มีค่าประมาณหลายร้อยเมกกะบิท/วินาทีขึ้นไป ส่วนตัวทวนสัญญาณ(REPEATER) เป็นตัวขยายสัญญาณ และสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของระบบเชิงเลขคือ สามารถที่จะสร้างสัญญาณเชิงเลขขึ้นมาใหม่ได้ง่าย ส่วนสาเหตุที่ทำให้เกิดการผิดพลาดคือ เกิดจากสัญญาณรบกวน (NOISE) ดังนั้น ข่าวสารที่ส่งในระบบนี้ซึ่งแทนด้วย "0" กับ "1" จึงง่ายต่อการสร้างขึ้นมาใหม่อีกครั้ง ในการตัดสินว่า "1" หรือ "0" ขึ้นกับการเปรียบของขนาดสัญญาณเชิงเลขที่ได้รับกับ ระดับอ้างอิง (REFERENCE LEVEL) ถูกตั้งไว้ประมาณครึ่งหนึ่งของขนาดสูงสุดพัลซ์ของสัญญาณรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักพื้นฐานของการทำให้เกิดขึ้นใหม่ (REGENERATIVE REPEATER) คือ การจัดรูปใหม่(RESHAPING),การจัดเวลา(RETIMING) และการสร้างขึ้นใหม่(REGENERATION)หน้าที่ของการจัดรูปใหม่ จะทำการชดเชยและรีเซฟสัญญาณรับ หน้าที่ของTIMING จะถูกดึงออกมาจากสัญญาณข้อมูล และทำการผลิตสัญญาณนาฬิกา(CLOCK PULSE)เพื่อใช้ในการติดสินว่าเป็น "1" หรือ "0" และการสร้างสัญญาณขึ้นใหม่

2.4. <u>การชิงโครไนเซชั่น</u> (SYNCHRONIZATION)

ในระบบการทำงานของอุปกรณ์ทางเชิงเลขจะต้อมีอัตราสัญญาณนาฬิกาของแต่ละส่วน มีอัตราเท่ากันหรือเป็นจำนวนเท่าของกันและกัน เพื่อเป็นตัวกำหนดจังหวะการทำงาน

ระบบสื่อสารทางเชิงเลข อุปกรณ์การส่งจะมีการส่งสัญญาณนาฬิกาหลักอยู่ 1 ตัว โดยที่ตัวทวนสัญญาณ (REPEATER) และอุปกรณ์การรับจะดึงเอาข้อมูลทางด้าน TIMING จากสัญญาณเชิงเลข เข้ามา เพื่อทำการกำเนิดอัตราสัญญาณนาฬิกาที่เหมือนกัน วิธีนี้เรียกว่า MASTER-SLAVE SYNCHRONIZATION

วิธีในการชิงโครไนเซชั่นมีหลายวิธี เช่น

1)พรีซิโอโครนัส(PRESIOCHRONOUS)

จะมีการตั้งสัญญาณนาฬิกาเอาไว้ทุกสถานีในการติดต่อ ซึ่งการกระทำด้วยวิธีนี้จะมีราคาแพงและไม่ประหยัด ในการมีเครื่องตั้งสัญญาณนาฬิกา ทุก ๆ สถานี

2)มิวชวล ซีนโครไนเซชั่น(MUTUAL SYNCHRONIZATION)

ในระบบจำนวนสัญญาณนาฬิกาทั้งหมด จะมีส่วนร่วมในการคำนวณหาสัญญาณนาฬิกาของระบบทั้งหมด และแต่ละสัญญาณนาฬิกาถูกควบคุมโดยสัญญาณที่ได้จากข้อมูลของTIMINGที่มาพร้อมกันกับข่าวสาร

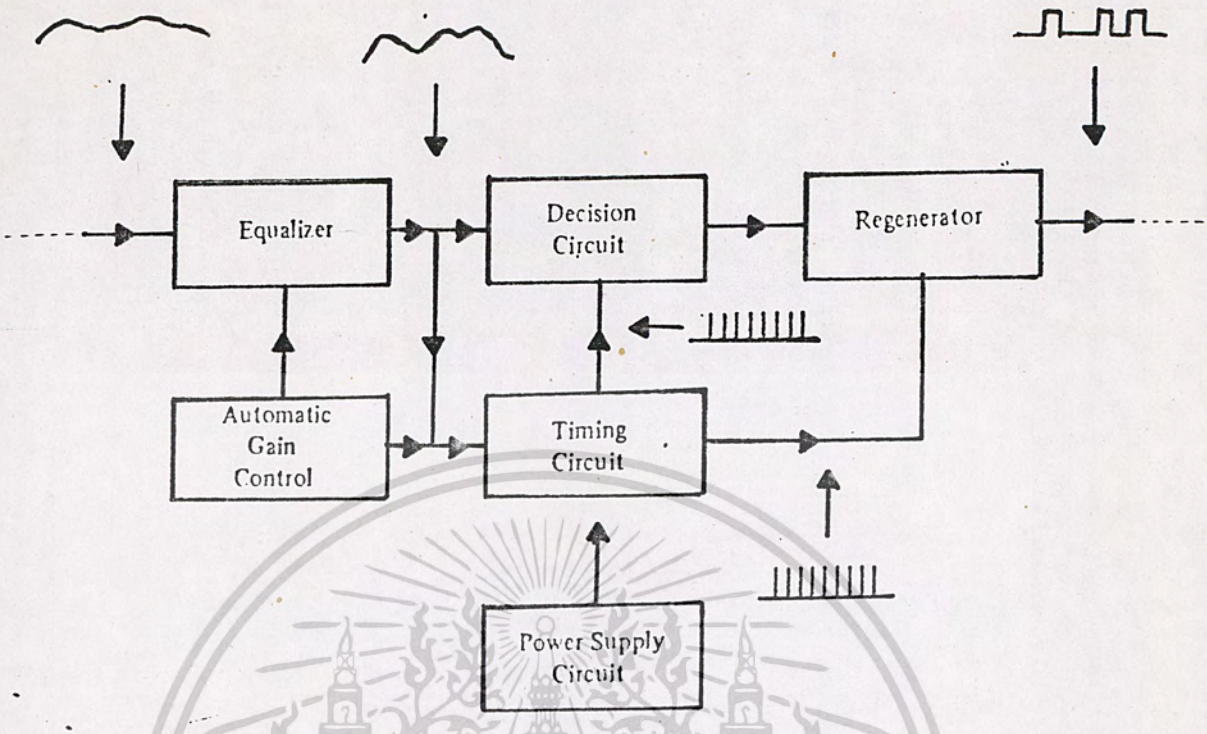
3)มาสเตอร์เสลฟ ซีนโครไนเซชั่น

(MASTER-SLAVE SYNCHRONIZATION)

ในระบบมีเพียงสัญญาณนาฬิกาหลักเพียงตัวเดียวที่จะหาสัญญาณนาฬิกาทั้งหมดของ ระบบในแต่ละสัญญาณนาฬิกาของสเลฟจะถูกควบคุมจากสัญญาณนาฬิกาหลักโดยตรง

การชิงโคนัสแบบที่ 3 นี้จะถูกใช้ในระบบสื่อสารภายในประเทศส่วนแบบแรกจะใช้ในระบบระหว่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แผนภาพรีเจเนอร์เรทีฟ รีพีทเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5. การตัดสินหาความผิดพลาดในระบบ PCM (Decision errors in PCM)

สิ่งที่มีผลต่อการกวนสัญญาณในระบบPCMเรามักจะนึกถึงควอนไตลซิ้งนอยส์ (quantizing noise) แต่ในความเป็นจริงแล้วยังมี ความผิดพลาดที่เกิดในช่วงการส่งด้วยในระบบPCMใดๆ การตัดสินหาความผิดพลาดจะปรากฏขึ้นให้เห็นน้อย แต่ก็มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นที่ ทุก ๆ การสร้างสัญญาณใหม่ที่สถานีทวนสัญญาณ (regenerative repeater) เราจะยกตัวอย่างผลของค่าผิดพลาดในระบบPCMมีการจัดระดับแบบเชิงเส้นที่ 1 คำประกอบด้วย 8 หลัก

ถ้าความผิดพลาดเกิดที่ดิจิตตัวสุดท้ายของกลุ่มค่า จะเป็นผลให้เกิดค่าผิดพลาดของขั้นของการจัดระดับ(Quantization)ขนาด δv เมื่อ 8 ดิจิตนี้ถูกแปลงกลับมาในรูปสัญญาณ แบบต่อเนื่อง(ANALOG) แล้วถ้าหากกลุ่มค่าถัดไปทุกดิจิต ผิดพลาดค่าโวลท์เตจที่ผิดไปจะเท่ากับ $2\delta v$ และค่าผิดพลาดในดิจิตที่ r^{th} จะทำให้เกิดค่าโวลท์เตจที่ผิดเท่ากับ $\delta v 2^{r-1}$ โวลท์

หากเราสมมติว่ามีเพียง 1 ดิจิตใน 8ดิจิตเกิดความผิดพลาดค่าเฉลี่ยกำลังสองของ โวลท์เตจความผิดพลาด จะเป็น

$$W = \sum_{r=1}^{8} \left(\frac{\delta v 2^{r-1}}{8}\right)^2$$

นี่คือค่า "พลังงานของสัญญาณรบกวน" ที่มีขึ้นแต่ละค่าผิดพลาด โดยที่ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาด คือ Pe ค่ากำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่เอ้าพุทของระบบเชื่อมโยงPCMที่เนื่องมาจากการหาความผิดพลาด คือ

$$W \times Pe = \frac{1}{8} \sum_{r=1}^{8} Pe/(\delta v\, 2^{r-1})^2 \text{ watts}$$

การรบกวนนี้จะรวมกับควอนไตลซิ้งนอยส์แล้ว แสดงผลกับสัญญาณ PCM ในกรณีของ PCM ค่าผิดพลาดในดิจิตที่อยู่ต้น ๆ จะร้ายแรงกว่าการผิดพลาดในดิจิตตัวท้าย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งสัญญาณเสียงในระบบที่ต้องการความสมบูรณ์ ในระบบ PCM (เช่น DAT, CD) ทุกดิจิตสัญญาณที่แปลงจะต้องสามารถที่หาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ แล้วทำให้ถูกต้องก่อนที่จะทำการแปลงสัญญาณกลับ

2.5.1 การตัดสินหาความผิดพลาดในสัญญาณข้อมูลถูกมอดูเลทด้วยคลื่นพาหะ

ในส่วนนี้เราจะยกตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับระบบ ASK, PSK และ FSK ในเงื่อนไขการรบกวนทั้ง 3ระบบนี้สามารถที่จะหาได้โดยวิธีโคฮีเรนท์ดีแทกท์ชั่น (coherent detection)

ก่อนอื่นเราพิจารณาจากโคฮีเรนท์ดีแทกท์ชั่นของ ASK ซึ่งอินพุทที่จะเข้าตัวถอดรหัสเป็น

$$Vim(t) = h(t)\cos(2\pi fct) + x(t)\cos(2\pi fct) + y(t)\sin(2\pi fct)$$

เมื่อ h(t) คือ ฟังชั่นของไบนารี่ (A,0)

[x(t) cos(2πfct)+y(t) sin(2πfct)]แทนช่วงจำกัดความถี่ (BAND LIMIT)ของสัญญาณรบกวนสีขาว (white-noise) ทั้งx(t)และ y(t)เป็นค่าตัวแปรสุ่ม (random variable) เรากำหนดให้ x(t) คือค่าผลรวม(sum) ขององค์ประกอบของ ไซนูซอยดัล(sinnusoidal)กับความถี่สุ่ม(random frequency) และเฟส(phase)

ถ้าหากค่าสัญญาณ ASK รวมกับสัญญาณรบกวนคือ ค่าที่ถูกหาแบบโคฮีเรนท์เช่นคูณด้วย cos (2πfct) และผ่านฟิลเตอร์จะได้ค่า เบสแบนด์ เอาท์พุท (baseband output)จะเป็น

$$Vout(t) = \frac{1}{2} h(t) + \frac{1}{2} x(t)$$

ที่เอาท์พุทของโคฮีเรนท์ ดีเทคเตอร์(coherent detector) คือ

$$Vout = (A \text{ หรือ } 0) + x(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไบนารี่ 1 และ 0มีโอกาสเกิดเท่ากัน และ σ^2 แทนค่าความแปรปรวน ของ x(t.) ค่า ความน่าจะเป็นของการผิดพลาด คือ

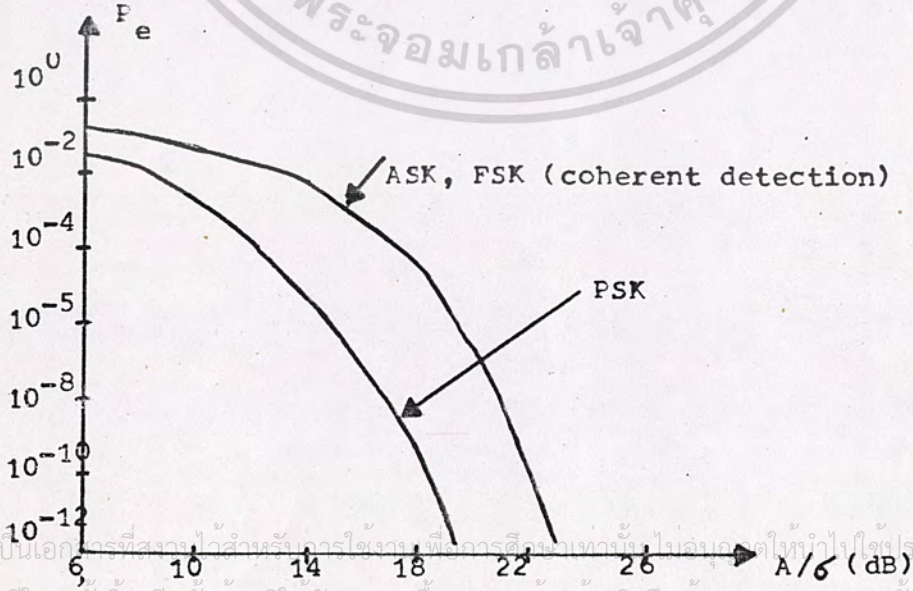
$$Pe(ASK) = \frac{1}{2}\{1-erf\ [A/(2\sqrt{\sigma 2})]\}$$

สำหรับPSK ค่าของ h(t)จะเป็น $\pm$Aและค่าดีซีสชั่น เทรสโฮลด์ (decision threshold)เท่ากับ 0โวลท์ ความน่าจะเป็นของการผิดพลาดเท่ากับ

$$Pe\ (PSK) = \frac{1}{2}[1-erf\ (A/\sqrt{\sigma 2})]$$

ค่าอัตราขนาดของสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนสำหรับ PSK คือ 6 dBต่ำกว่าของ ASK สำหรับอัตราความผิดพลาด ที่ให้มา

ถ้าเราคิดว่า ASK จะไม่ส่งสัญญาณใด ๆ ที่ทุก ๆ ไบนารี่ 0 มันจะทำให้เกิด อัตราความผิดพลาด เดียวกันกับของ PSK ที่มีอัตราเฉลี่ยของ SNR 3 dB ต่ำกว่าค่าที่ ASK ต้องใช้หรืออาจกล่าวได้ว่า PSKได้เปรียบอยู่3dB ในเทอมของอัตรากำลัง SNRเหนือกว่า ASK จะดูได้จากรูป 13 ในเทอมของความน่าจะเป็นของความผิดพลาด

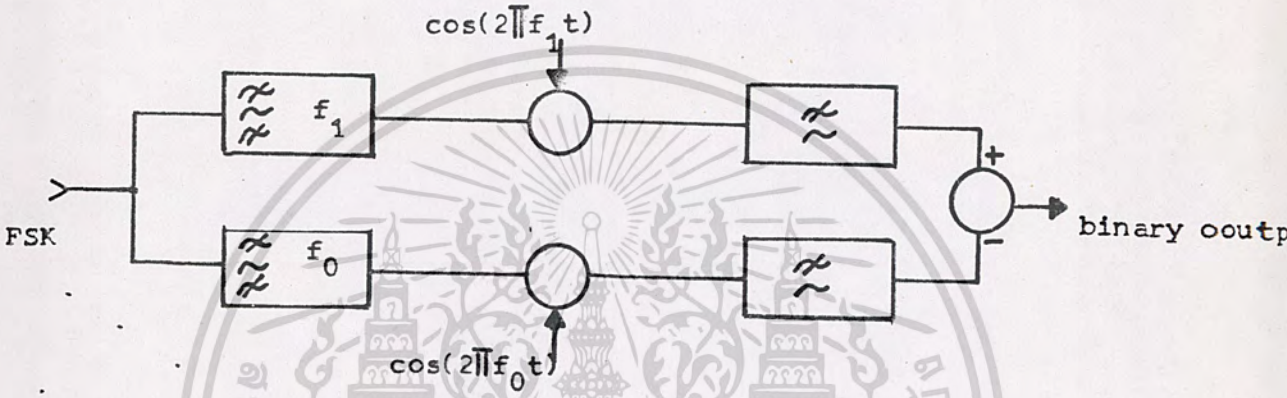


รูปที่ 14 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดของพลังงานสัญญาณเฉลี่ยคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FSK โมเด็ม ชนิด โคฮีเรนท์ ดีเทคชั่น

ดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งประกอบด้วยพรี-ดีเทคชั่น ฟิลเตอร์(pre-detection filters)ซึ่งสมมุติว่ามีคุณสมบัติเป็นแบน-พาส(band-pass)ในอุดมคติ พิจารณาช่วงกว้าง(bandwidth)และพลังงานของสัญญาณรบกวนขาเข้า(input noise power) ในแต่ละโคฮีเรนท์ ดีเทคชั่น



รูปที่ 15โคฮีเรนท์ FSK โมเด็ม(Coherent FSK modem)

ค่าอินพุทโวลท์เตจ ที่แต่ละ ตัวทอดรหัส จะเป็นทั้ง

$$V_1(t) = h_1(t)\cos(2\pi f_1 t) + x_1(t)\cos(2\pi f_1 t) + y_2(t)\sin(2\pi f_1 t)$$

และ

$$V_o(t) = h_o(t)\cos(2\pi f_o t) + x_o(t)\cos(2\pi f_o t) + y_o(t)\sin(2\pi f_o)$$

เมื่อ $h_1(t)$ คือ องค์ประกอบทางลอจิคัลของ $h_o(t)$, $x_1(t)$ และ $X_o(t)$ คือค่าตัวแปรผันผวนอิสระ (independent random variables)โดยที่ ช่วงความถี่ผ่านของแต่ละ พรี-ดีเทคชั่น ฟิลเตอร์ ไม่มีการซ้อนทับกันซึ่งกัน ที่เอาท์พุทจะได้

$$Vout(t) = (+A \text{ or } -A) + [x_1(t) - x_o(t)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $x_1(t)$ และ $x_0(t)$ เป็นตัวแปรอิสระแบบเกาซ์เซียนแล้วตัวแปร $[x_1(t)-x_0(t)]$ จะเป็นเกาซ์เซียน ที่มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าแปรปรวนเริ่มต้น (original varience) และค่าสัญญาณรบกวนที่ เอาท์พุท ของ ตัวทอดรหัส (detector) จะเป็น $2\sigma^2$ ซึ่งทำให้เกิดค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ย (signal-to-rms noise ratio) $2A/(\sqrt{2}\sigma)$ ในกรณีนี้ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเท่ากับ

$$Pe(FSK) = \frac{1}{2}[1-erf\ (A/2\sigma)]$$

หมายความว่าถ้า FSK และ PSK ถูกส่งไป จะให้เกิดความน่าจะเป็นที่เกิดผิดพลาดเท่ากัน แล้ว FSK ต้องการ ค่า SNR มากกว่าของ PSK 3 dB.

ในทางปฏิบัติ เราใช้ชนิดของการหาค่าซองเซต (envelope detection) ต่างไปเล็กน้อยเพราะมีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางสถิติของสัญญาณรบกวนค่าอินแสทนท์เทนัส ดีเทคเตอร์ เอาท์พุท (instantaneous detector output) จะเป็น

$$Vout = k[\{h(t)+x(t)\}^2 + \{y(t)^2\}]^{1/2}$$

การคำนวณค่า ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด เราต้องทราบค่า PDF ของสมการนี้เมื่อ $h(t)=0$ (ไบนารี่ 0) และ $h(t) = A$ (ไบนารี่ 1) ในกรณีก่อนหน้า ค่าฟังก์ชั่นความหนาแน่นมีการกระจายแบบเรลี่ (Rayleigh) เป็น

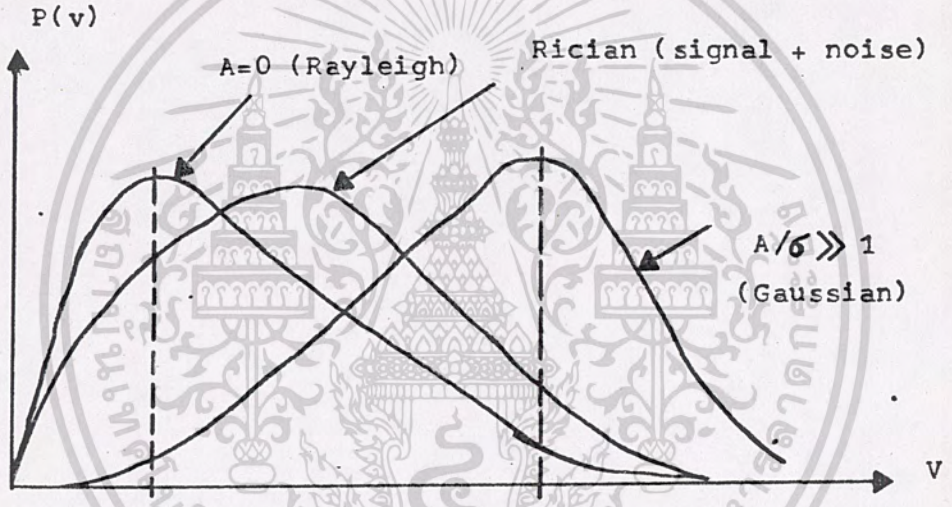
$$Po(v) = (v/\sigma^2)\ exp\ (-v^2/2\sigma^2)\ \text{เมื่อ}\ v \geqslant 0$$

และในกรณีต่อมาค่า ฟังก์ชั่นความหนาแน่น มีการกระจายแบบ ริเซี่ยน (Rician) เขียนได้เป็น

$$p_1(v)=(v/\sigma^2)exp[-(v^2+A^2)/2\sigma^2]I_0(vA/\sigma^2)\ \text{เมื่อ}\ v \leqslant 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_o(x)$ คือค่าแก้ไขของเบสเซล ฟังชั่น(Bessel function) ของลำดับที่ 0 การกระจายแบบ ริเชี่ยน จะเข้าใกล้เคียงกับการกระจายแบบเกาซ์เชี่ยน เมื่อ$A/\sigma >> 1$, ค่าความน่าจะเป็นของฟังก์ชั่นความหนาแน่นแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ค่าซองเขตการกระจายของสัญญาณและสัญญาณรบกวน
(Envelope distribution for signal+noise)

เราแสดงได้ว่าค่า ดีซีสชั่นเทรสโฮลด์ สำหรับเอ็นวีล็อบดีเทคเตอร์(envelope detector) คือ

$$T = A^2/2\sigma^2 + \text{Ln}\ (P_o/P_1)$$

ค่าเปรียบเทียบนี้ มักจะแสดงสำหรับ เอ็นวีล็อบ ดีเทคชั่น ที่มี SNRs สูง ส่วนสำหรับแบบที่มี SNRs ต่ำ จะมีการแสดงที่แย่ลงในทางปฏิบัติของเครื่องรับแบบ เอ็นวีล็อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การหาความสัมพันธ์กับแมท์ฟิลเตอร์ริ่ง(Matched Filtering and Correlation)

ในทุกระบบสื่อสารแบบดิจิตอลเบสแบน(baseband) หรือแคเรียมอดูเลท ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดจะขึ้นอยู่ SNR ดังนั้นเราจึงต้องพิจารณาหาเทคนิคที่จะทำให้เกิดค่าสูงสุดของอัตราส่วน A/σ ซึ่งแมทช์ฟิลเตอร์ริ่งคือเทคนิคอันหนึ่ง

แมทช์ ฟิลเตอร์(match filter) จะถูกออกแบบเพื่อให้ได้ค่าสูงสุดของSNR ที่ช่วง t_o หลังจากนำสัญญาณให้เข้าที่อินพุทของมัน โดยเราจะพิจารณารูปลักษณะของสัญญาณโวลท์เตจทั่วไปคือh(t) ด้วยฟูเรียร์ ทรานฟอร์ม (Fourier transform)H(f) ที่ใช้ฟิลเตอร์ที่ตอบสนองความถี่ P(f)

ค่าขนาด สเป็คตรัม ของ เอาท์พุท จะเป็น

$$G(f) = P(f)\ H(f)$$ และจะมี ฟูเรียร์ ทรานฟอร์ม เป็น

$$g(t) = \int P(f)\ H(f)\ \exp(j2\pi ft)\ df$$

ค่าขนาดของสัญญาณนี้ที่เวลา t_o คือ

$$|g(t_o)| = \left| \int P(f)\ H(f)\ \exp(j2\pi ft_o)\ df \right|$$

ดังนั้นค่า พลังงานของสัญญาณ (normalized) ที่เวลา t_o คือ

$$Sp = |gt_o|^2 = \left| \int P(f)\ H(f)\ \exp(j2\pi ft_o)\ df \right|^2$$

P(f)ถูกกำหนดทั้งด้านบวกและลบของความถี่ ดังนั้นเราต้องใช้ความเข้มพลังงานสเป็คตรัมทั้งสองด้าน(double-sidedpower spectral density) ของ $\eta/2$ W/Hz สำหรับไวท์นอยส์(white noise)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุทของฟิลเตอร์จะไม่สูงไปกว่าไวท์นอยส์แต่จะมีค่าพลังงาน สเป็คตรัม(Power spectrum) เป็น

$$N(f) = \frac{\eta}{2} |P(f)|^2$$

พลังงานของสัญญาณรบกวน ที่ฟิลเตอร์เอาท์พุทจะเป็น

$$Np = (\eta/2) \int |P(f)|^2 \, df$$

ค่า SNR ที่เวลา t_o จะเป็น

$$SNR = \frac{\left| \int P(f) H(f) \exp(j2 ft_o) \, df \right|^2}{(\eta/2) \int |P(f)|^2 \, df}$$

ค่าความถี่ตอบสนองของฟิลเตอร์จะถูกเลือกให้มีค่าสูงสุด ทำได้โดยใช้วิธี Schwartz inequality ซึ่งมีว่าผลรวมของสองด้านของสามเหลี่ยมจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับด้านที่ 3 ในรูปแบบการอินทิเกรตเขียนได้เป็น

$$\int A^*(x)A(x)dx \int B^*(x)B(x)dx \geq \left| \int A^*(x) B(x)dx \right|^2$$

ความไม่เสมอภาคกันนี้จะเท่ากันหากA(x)และ B(x)คือ โค-ลิเนียร์ (CO-LINEAR) เช่น $A(x) = kB(x)$ ถ้า $A^*(x) = H(f)\exp(j2\pi ft_o)$ แล้วcomplex conjugate ของมัน $A(x) = H^*(f) \exp(-j2\pi ft_o)$ และถ้าB(x) = P(f) แล้ว $B^*(x) = P^*(f)$

สมการที่แล้วสามารถเขียนได้เป็น

$$\int |H(f)|^2 df \int |P(f)|^2 df \geq \left| \int P(f)H(f)\exp(j2\pi ft_o)df \right|^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int |H(f)|^2 \, df \geq \frac{\left| \int P(f)\, H(f)\, \exp(j2\pi f t_o)\, df \right|^2}{\int |p(f)|^2 \, df}$$

จากสมการ SNR เราได้ว่า

$$\frac{2}{\eta} \int |H(f)|^2 \, df \geq SNR$$

แต่ $\int |H(f)|^2 \, df$ คือพลังงานของสัญญาณ (E) ค่าสูงสุดของ SNR จะได้

$$SNRmax = 2E/\eta$$

ค่านี้จะขึ้นกับผลของอัตราส่วนของพลังงานของสัญญาณกับนอยส์สเป็คทรัลเด็นซิตี้ (noise spectral density) และไม่มีผลขึ้นกับรูปร่างของลักษณะสัญญาณค่า SNR จะมากที่สุด เมื่อ

$$A(x) = kB(x), \text{ i.e}$$

$$H^*(f) \exp(-j2\pi f t_o) = kP(f)$$

การตอบสนองต่อ อิมพัลซ์(impulse) ของแมทช์ฟิลเตอร์จะเท่ากับ

$$p(t) = \frac{1}{k} \int H^*(f) \exp(-j2\pi f t_o) \exp(j2\pi f t) \, dt$$

คือ

$$p(t) = \frac{1}{k} h(t_o - t)$$

การตอบสนองต่อ อิมพัลซ์ คือ เวลาในการย้อนกลับของสัญญาณ อินพุท h(t) ด้วยเวลา t_o โดยที่ค่าของ t_o จะต้องมากกว่าช่วงกว้างของสัญญาณซึ่งแมทช์กับฟิลเตอร์ ตัวอย่างเช่น แมทช์ฟิลเตอร์สำหรับสัญญาณเร็คแทนกูล่าที่มีแอมปลิจูด A และช่วงกว้าง t_1 ซึ่งมี ฟูเรียร์ ทรานฟอร์ม คือ

$$H(f) = \int A \exp(-j2\pi f t) \, dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f) = (At_1/2)\ \mathrm{sinc}(\pi f t_1)$$

ดังนั้นจาก $P(f) = KH^*(f)\exp(-j2\pi f t_o)$

$$P(f) = [\mathrm{sinc}(\pi f t_1)\exp(-j2\pi f t_o)]/K$$

นี่ก็คือ โลว์-พาส ฟิลเตอร์ ที่มีลักษณะเป็นลิเนียร์เฟสชิฟแมทช์ฟิลเตอร์ สามารถทำได้กับสัญญาณทุกรูปแบบ

เมื่อ รูปแบบ FSK เป็น อินพุทของแมทช์ฟิลเตอร์ค่า SNR ที่เอาท์พุท ก็จะเท่ากับ $2E/\eta$

ถ้าเราเขียนสมการ $g(t)$ แสดงแมทช์ฟิลเตอร์ริ่งในเทอมของคอนโวลูชั่น อินทิกรัล(convolution integral) จะเป็น

$$g(t) = \int h(t)\ h(t_o - t)\ dt$$

เราสามารถเปรียบเทียบสมการนี้กับสมการของครอส-โคริเลชั่น (cross-correlation)ระหว่างสองสัญญาณรูป $h(t)$ และ $y(t)$.

$$Rhy(\tau) = \int h(t)\ y(t+\tau)\ dt$$

ถ้าเราให้ $y(t+\tau) = h(t_o - t)$ เราจะเห็นได้ว่าแมทช์เตอร์ริ่ง คือค่าเทียบเคียง(equivalent)ของครอส-โคริเลชั่นของสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน $h(t)$กับสัญญาณที่ปราศจากสัญญาณรบกวน $h(t_o - t)$ ซึ่งคือการตอบสนองอิมพัล(impulse)ของแมทช์ฟิลเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างรูปสัญญาณ $h(t)$ และ $y(t)$กำหนดโดย

$$R(\tau) = \frac{\int h(t)\ y(t+\tau)\ dt}{\left[\int h^2(t)\ dt \int y^2(t)\ dt\right]^{1/2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหารของสมการนี้ คือค่านอมอลไลซ์(normalizing)ซึ่งทำให้ $R(\tau)$ เป็นอิสระกับค่ามีนสแควร์ของ $h(t)$ และ $y(t)$ ที่อยู่ในช่วง $\pm$ 1 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อ $h(t) = ky(t)$ แล้ว $R(\tau) = +1$
และเมื่อ $h(t)=-ky(t)$ แล้ว $R(\tau) = -1$

$R(\tau)$ คือการวัดความเหมือนกันของรูปร่างสัญญาณ(waveform) $h(t)$ และ $y(t)$ การหา ความสหสัมพันธ์มักจะถูกใช้ เมื่อมีเหตุการณ์ SNR $\ll$ 1เช่นการใช้งานผ่านอากาศนั้น ที่รูปสัญญาณของเครื่องรับ จะประกอบไปด้วยนอยส์จำนวนมาก

ในการใช้งานจริงมักใช้แมทช์ ฟิลเตอร์ มากกว่าใช้ โลว์-แพส หรือ แบน-แพส ฟิลเตอร์ ธรรมดา เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ

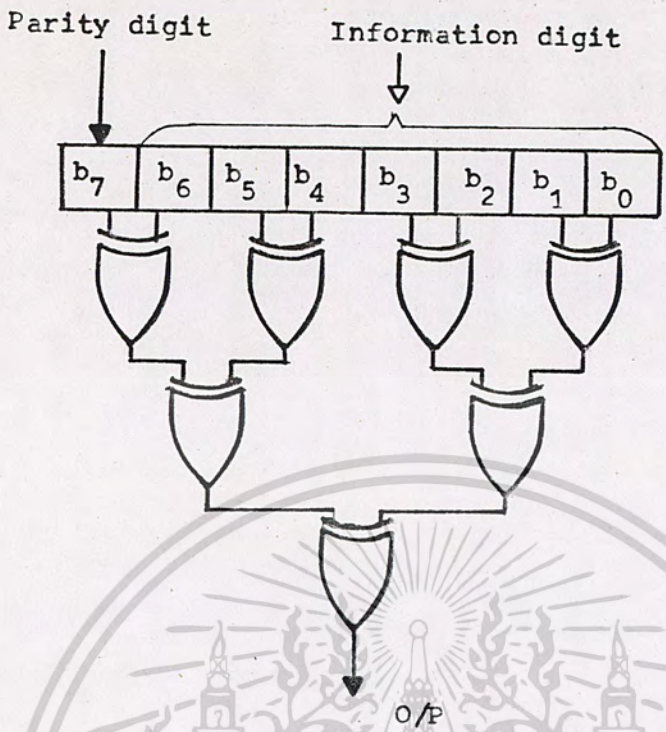
อย่างไรก็ดีเมื่อ SNR เป็นตัวสำคัญมากเช่นในสัญญาณเรดาร์(RADAR) ต้องมีการใช้ แมทช์ฟิลเตอร์ริ่ง และหลักการ สหสัมพันธ์(correlation techniques) ร่วมกัน

2.7. การตรวจหาความผิดพลาดและแก้ไข(Error Detection and Correction)

ความเป็นไปได้ของความผิดพลาด ในระบบการส่งแบบเชิงเลข ที่ขึ้นกับ SNR ที่อินพุทของเครื่องรับ ค่าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงสุดเมื่อใช้แมทช์ฟิลเตอร์ริ่ง ซึ่งทำให้เกิด ความน่าจะเป็นของความผิดพลาด รูปแบบนี้สามารถลดรูปโดยใช้ รหัส ที่เรียกว่ารหัสบล็อค(block code) สำหรับสัญญาณแบบเชิงเลขโดย รูปแบบของรหัสนี้ เป็นแบบ ส่งสัญญาณซ้ำ ๆ ไป ซึ่งตัวมันไม่ได้ซ้ำเองโดยธรรมชาติ

รหัส ที่ใช้โดยทั่วไป จะใช้ 7 ดิจิตอล แทนความหมายและใช้ 1ดิจิตเป็นตัวเช็ค อาจใช้แบบ คี่หรือคู่ก็ได้ เครื่องรับ จะเช็คทุก ๆ 8 บิท แบบ คู่หรือคี่ แล้วแต่ระบบที่ใช้ ถ้าตัวเช็คพลาดจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นและจำเป็นต้องมีการส่ง 8 บิทนั้นมาอีกครั้ง การเช็คก็ทำได้โดยใช้เอ็กคลูซีฟ ออร์ สำหรับ 8 บิทในแต่ละค่า หากจำนวนของ 1 ใน ค่ารหัส (code word)เป็นคี่ผลที่ได้จากเอ็กคลูซีฟ ออร์จะเป็น 1 และถ้าจำนวนของ 1เป็นคู่ผลที่ได้ก็จะเป็น 0 วงจรเช็คบิท แสดงได้ดังรูปที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 16 การตรวจจับความผิดพลาดโดยใช้ ซิงเกิ้ลพาริตี้ดิจิต
(Error detection using a single parity digit)

คุณสมบัติการหาความผิดพลาด โดยรหัสนี้ สามารถแสดงได้โดยเปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ในกรณีไม่ใช้รหัสกับกรณีที่ใช้รหัส เราให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในกรณีที่ไม่ใช้รหัส เป็น Pe ความน่าจะเป็น ของความผิดพลาด ที่ไม่ตรวจพบ ในกรณีของใช้รหัส จะเป็นความน่าจะเป็นของจำนวนคู่ของความผิดพลาดการเช็คที่เครื่องรับจะล้มเหลวบ่งบอกถึงความผิดพลาดเฉพาะเมื่อเกิดจำนวนคี่ เราจะเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของความผิดพลาด ในกรณีที่ไม่ใช้รหัสกับความน่าจะเป็นของจำนวนคี่ของความผิดพลาดในกรณีใช้รหัส

ถ้ามี n ดิจิตในแต่ละค่ารหัส(code word)ความน่าจะเป็นของดิจิตอันหนึ่งจะผิดคือ จะผิด 1 ดิจิต และ (n-1) ดิจิตถูก ความน่าจะเป็นร่วม คือ

$$Pj = Pe(1-Pe)^{n-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มี n ดิจิตในกลุ่ม และสมการนี้ คือความน่าจะเป็นที่ดิจิตหนึ่งจะถูกรับมาผิด ค่ารวมของความน่าจะเป็นใน n ดิจิต จะเป็น

$$P = nPe\ (1-Pe)^{n-1}$$

เช่นในกรณีที่ไม่ใช้ รหัส เมื่อ n=7 ถ้า $Pe = 10^{-4}$ ความน่าจะเป็นของหนึ่งความผิดพลาดใน 7 ดิจิตคือ

$$Pt = 7x10^{-4} \times (0.9999)^{6} = 7x10^{-4}$$

ความน่าจะเป็นที่จะเกิด r ความผิดพลาดในกลุ่ม n ดิจิต คือ จะมี r ดิจิตที่ถูกรับมาผิด และมี (n-r) ที่รับมาถูก

$$Pj = P^{r}e\ (1-Pe)^{n-r}$$

มีความเป็นไปได้ ${}^{n}Cr$ ของ r ดิจิตที่รับมาผิดในจำนวนทั้งหมด n ดิจิต

$${}^{n}Cr = \frac{n!}{r!\ (n-r)!}$$

ความน่าจะเป็นรวมของกรณีนี้ก็คือ

$$Pt = {}^{n}Cr\ Pe^{r}(1-Pe)^{n-r}$$

ในกรณีที่ใช้รหัส ดิจิตพิเศษจะถูกรวมเข้ากับ 7 บิตเริ่มแรก เราต้องการความน่าจะเป็นของจำนวนคู่ของความผิดพลาด ใน 8 ดิจิต

ความน่าจะเป็นของ 2ความผิดพลาด $= {}^{8}C2\ (10^{-4})^{2}(1-10^{-4})^{6} = 2.8 \times 10^{-7}$
ความน่าจะเป็นของ 2ความผิดพลาด $= {}^{8}C4\ (10^{-4})^{4}(1-10^{-4})^{4} = 7 \times 10^{-15}$
ความน่าจะเป็นของ 2ความผิดพลาด $= {}^{8}C6\ (10^{-4})^{6}(1-10^{-4})^{2} = 2.8 \times 10^{-23}$
ความน่าจะเป็นของ 2ความผิดพลาด $= {}^{8}C8\ (10^{-4})^{8} = 10^{-32}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความน่าจะเป็นรวมของการไม่ตรวจจับความผิดพลาดได้ของกรณีใช้รหัส คือ

$$2.8\times10^{-7} + 7.0\times10^{15} + 2.8\times10^{-23} + 10^{-32} \simeq 2.8 \times 10^{-7}$$

เห็นได้ว่า ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในกรณีใช้รหัส จะน้อยกว่าในกรณี 7 ดิจิตในกรณี ที่ไม่ใช้รหัส

เราสมมติว่าในตัวอย่างนี้อัตราเร็วในการส่งดิจิตไม่เปลี่ยนแปลง หมายความว่า อัตราของข้อความที่ส่งจะต้องน้อยลง 7/8 ของค่าของมันในระบบไม่ใช้รหัส คือว่า ค่าแบนด์วิดท์(bandwidth) จะต้องเพิ่มขึ้น 8/7 เท่าของค่าเดิมโดยเพิ่มมาที่ตัวดิจิตที่เช็ค การเพิ่มขึ้นนี้จะไปเพิ่ม พลังงานของสัญญาณรบกวน ในอัตราส่วนเหมือนกันคือค่าเฉลี่ยสัญญาณรบกวน(RMS NOISE) จะต้องเพิ่มขึ้น1.069เท่าของค่าเดิม ซึ่งผลในการเพิ่มสัญญาณรบกวนนี้จะมีผลต่อความน่าจะเป็นของความผิดพลาดจึงต้องคำนวณ สมมติว่ากรณีไม่ใช้รหัสมีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาด $Pe = 10^{-4}$ แล้วได้ว่า

$$\text{erf}\,[(A/(2\sqrt{2}\sigma))] = 1-2\times10^{-4}$$

ได้

$$A/(2\sqrt{2}\sigma) = 2.63$$

ถ้าค่าเฉลี่ยสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นในอัตรา 1.069 จะทำให้อัตราส่วนนี้มีการลดลง เช่น อัตราส่วนเป็น 2.46 ซึ่งทำให้เกิดความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในกรณีไม่ใช้รหัสเป็น $Pe = 2.51 \times 10^{-4}$ ซึ่งค่านี้จะต้องเป็นค่าที่ใช้ในสมการ Pt ของกรณีไม่ใช้รหัส ซึ่งได้

$$Pt = 1.75 \times 10^{-6}$$

ดังนั้นถึงแม้ว่าสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นมา นำมาคำนวณค่าที่ลดลงของความน่าจะเป็นในกรณีไม่ใช้รหัสก็ยังต้องพิจารณา ไม่ใช่ในกรณีนี้เท่านั้นแม้ในระบบที่ใช้หลายดิจิตเป็นตัวช่วยเช็คสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นมาจากการเพิ่มแบนด์วิดท์(bandwidth)สามารถตัดทิ้งไปด้วยคุณสมบัติที่ดีของรหัสที่มีการตรวจจับความผิดพลาด(error-detecting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของ รหัส ที่มีการตรวจจับความผิดพลาด สามารถทำให้สูงขึ้นโดยการรวมวิธีการทำความผิดพลาดให้ถูก (errorcorrection) ด้วยการเพิ่มรีดันแดนซี่ (redundancy) ลองพิจารณาตัวอย่างรหัส ที่ใช้ 16 ดิจิตสำหรับข้อมูลและ 8 ดิจิตสำหรับเช็คคือมีรหัสรีดันแดนซี่(code redundancy) 33% ในตัวอย่างนี้ 16 ดิจิตที่เป็นข้อความเป็นกลุ่มเมตตริกซ์4x4 และดิจิตที่ใช้ตรวจสำหรับระบบคู่หรือคี่ จะถูกส่งไปสำหรับแต่ละแถวและแนวของเมตตริกซ์

column parity digits		column check fails	
0 0 1 0		0 0 1 0	
0 1 1 1	1	0 0 1 1	1 Row check
0 1 1 0	0	0 1 1 0	0 fails
1 0 0 0	1	1 0 0 0	1
1 0 1 1	1	1 0 1 1	1
Row parity digits			

ถ้าหากเกิดความผิดพลาดขึ้น 1 ดิจิต ใน 16 ดิจิตของข่าวสาร แล้ว.ตัวเช็คในแถวและหลักจะล้มเหลวทั้งคู่ จุดที่ตัดซึ่งกันและกันของ แถวและหลักจะเป็นตัวบอกว่า ดิจิตนี้ผิดถ้าหากตัวเช็คนี้ผิดเพียงดิจิตเดียว แสดงว่าเพียงในแถวหรือหลักเดียวจะพลาดในการเช็คเราก็จะสามารถที่จะแก้ไขดิจิตที่ผิดให้ถูก

ตัวอย่างที่ผ่านมานี้ แสดงให้เห็นความสามารถที่เป็นไปได้ ของการทำความผิดพลาดให้ถูกต้อง ในการใช้งานทั่วไปมีการใช้เออเลอร์-คอเร็คติ่งโคด (error-correcting codes) อยู่หลายชนิดซึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายก็คือแบบของแฮมม์มิ่ง (Hamming) ตัวอย่างเช่น รหัสการทำ 1 ความผิดพลาดให้ถูกต้องโดยวิธีแฮมม์มิ่ง(Hamming's single-error-correcting code) ที่จะพิจารณาต่อไปนี้เราสมมุติว่าดิจิตข่าวสารเริ่มต้น มีอยู่ในกลุ่ม m ดิจิต ซึ่งรวมกับอีก c ดิจิต ที่ใช้เช็ค เราจะให้ m=4 และ c=3 ในแต่ละ รหัสก็จะมีทั้งหมด 7 ดิจิตและแทนข้อความได้ 2^7 = 128 ค่า ที่แตกต่าง แต่จะมีเพียง 2^4 = 16 ค่า ที่ใช้ส่งข่าวสารที่แท้จริง ใน 16 ค่ารหัส นี้จะเลือกจากความเป็นไปได้ 128 เพื่อให้ได้เป็น single-error-corecting โดย ค่ารหัส ที่สามารถเลือกได้แสดงดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ แสวงหาผลประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Original message				Transmitted code						
M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	C1	C2	C3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1
1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0
1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ในแต่ละค่ารหัสในตารางจะมีความต่างกันอย่างน้อยสามจุด ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ามีแฮมม์มิ่ง ดีสแตนซ์(Hamming distance)อยู่ 3 หมายความว่าจะต้องมีความผิดพลาดเกิดอย่างน้อย3ความผิดพลาดเพื่อที่จะทำให้ค่ารหัส อันหนึ่งกลายไปเป็นอันอื่น หากเกิดความผิดพลาดเพียงอันเดียวในค่ารหัส ที่รับได้ มันจะต่างไปจาก ค่ารหัส ที่ถูกต้องเพียงดิจิตเดียว และต่างจากค่ารหัสอื่นอย่างน้อย 2 ดิจิต ดังนั้น ค่ารหัส ที่ถูกสามารถเลือกได้จากค่ารหัส ที่มีความแตกน้อยที่สุดกับค่ารหัสที่รับได้ การจะทำเช่นนี้ได้ที่เครื่องรับจะต้องมีรายละเอียดของค่ารหัส ทั้งหมดและนำมาเปรียบเทียบกับค่ารหัส ที่รับมาจนกว่าจะเกิดการแมทช์กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ระหว่างข้อมูลข่าวสารและข้อมูลตรวจสอบจะอยู่ในลักษณะ

2 เงื่อนไข (exclusive-OR) และอธิบายโดยหลักการของแฮมม์มิ่งกฎเกณฑ์สำหรับ บล็อครหัส 7 หลักที่ประกอบด้วย 4 หลักข่าวสารและ 3 หลักสำหรับเช็ค คือ

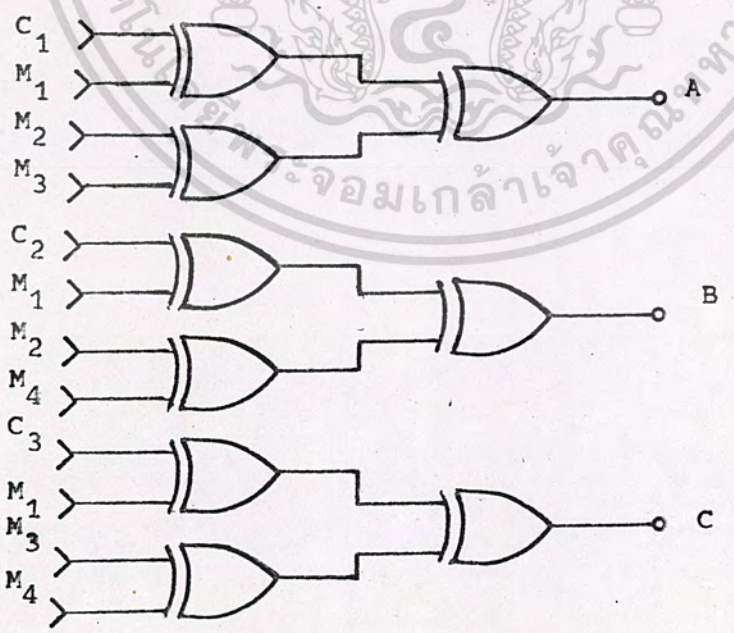
$$C1 = M1 \oplus M2 \oplus M3$$
$$C2 = M1 \oplus M2 \oplus M4 \qquad (1)$$
$$C3 = M1 \oplus M3 \oplus M4$$

โดย $C1 \oplus C1 = 0$ สมการเหล่านี้เขียนได้เป็น

$$C1 \oplus M1 \oplus M2 \oplus M3 = 0$$
$$C2 \oplus M1 \oplus M2 \oplus M4 = 0 \qquad (2)$$
$$C3 \oplus M1 \oplus M3 \oplus M4 = 0$$

หากไม่มี ความผิดพลาด เกิดที่เครื่องรับลักษณะ 2 เงื่อนไข แสดงได้โดยสมการ (2) จะทำให้เกิดผลลัพธ์เป็นไบนารี่ 0 หากเกิดความผิดพลาดขึ้น 1 ตัว ในดิจิตข่าวสารหรือ ดิจิตเช็คจะทำให้อย่างน้อยหนึ่งส่วนของสมการ (2) เกิดไบนารี่ 1

รูปแบบวงจรการเช็คสำหรับ 7 ดิจิต รหัสบล็อค(block code) แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 วงจรตรวจสอบพาริตี้(Parity checking network)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเราแทนดิจิตที่ถูกด้วย y และแทนดิจิตที่ผิดด้วย N ค่าที่เป็นไปได้ของ A, B, C สำหรับ 1 ความผิดพลาด แสดงได้ดังตาราง 1

M1	M2	M3	M4	C1	C2	C3	A	B	C
Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	0	0	0
Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	1	0	0
Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	0	1	0
Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	0	0	1
Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	1	1	1
Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	1	1	0
Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	1	0	1
N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	0	1	1

ตาราง 1

เอาท์พุท A, B, C ของรูปวงจรเช็ค จะเห็นว่าจัดอยู่ในรูปเมตตริก 3x8 จำนวนของคอลัมน์ ในเมตริกจะเท่ากับจำนวนดิจิตที่ใช้เช็ค และในแต่ละแถว ยกเว้นอันแรกจะมีรูปแบบซิงเกิ้ลเออเลอร์(singleerror)หมายถึงว่าจำนวนดิจิต ที่ใช้ตรวจสอบ c สามารถกำหนดตำแหน่งความผิดพลาด 2^c-1 ตำแหน่งโดยต้องเกิดเพียง 1 ความผิดพลาด

ถ้าหากมีดิจิตข่าวสาร m และดิจิตเช็ค c แล้ว สำหรับการทำซิงเกิ้ลเออเลอร์ คอเร็คติงก์โคด ความสัมพันธ์ระหว่าง m และ c จะเป็น

$$m+c \leqslant 2^c-1$$

การทำ ซิงเกิ้ลเออเลอร์คอเร็คติงก์โคด (single-error-correcting code) ที่เป็นไปได้ แสดงไว้ในตาราง 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ยิ่งใช้ c มาก ประสิทธิภาพของรหัสยิ่งดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c	$n(=2^c-1)$	m	Code type(n,m)	Efficiency $m/2^c-1$
1	1	0	-	-
2	3	1	(3,1)	0.33
3	7	4	(7,4)	0.57
4	15	11	(11,11)	0.73
5	31	26	(31,26)	0.83
6	63	57	(63,57)	0.90
7	127	120	(127,120)	0.94
8	225	247	(225,247)	0.97

ตาราง 2

กลับมาดูที่ตาราง 1ในการใช้งานจริง เราจำเป็นที่จะต้องทำความผิดพลาดให้ถูกต้องเฉพาะใน ดิจิตข่าวสาร หมายความว่า เราทำเฉพาะใน 4 แถวสุดท้ายของ เมตตริกที่ใช้เช็ค นำมาพิจารณา จะเห็นความสัมพันธ์ ดังนี้

$$X \oplus 1 = x \text{ และ } x \oplus 0 = x$$

หมายความว่าถ้าดิจิตที่รับได้เกิดผิดพลาด มาเอ็กคลูซีฟ ออร์(exclusive-OR) กับ 1 จะสร้างค่าที่ถูกได้ ถ้าดิจิตที่รับเข้ามาถูกต้องเมื่อเอ็กคลูซีฟ ออร์ กับ 0 จะทำให้ค่าที่รับได้ถูกต้องเหมือนเดิม ด้วยเงื่อนไขอันนี้ เราสามารถออกแบบวงจรเออเลอร์ คอเร็คติงก์ ที่ประกอบไปด้วยเอ็กคลูซีฟ ออร์เกท ซึ่งแสดงดังรูปที่ 18 โดยอินพุท W,X,Y,Z แทน เมตตริกซ์ที่ใช้เช็คของตาราง 1

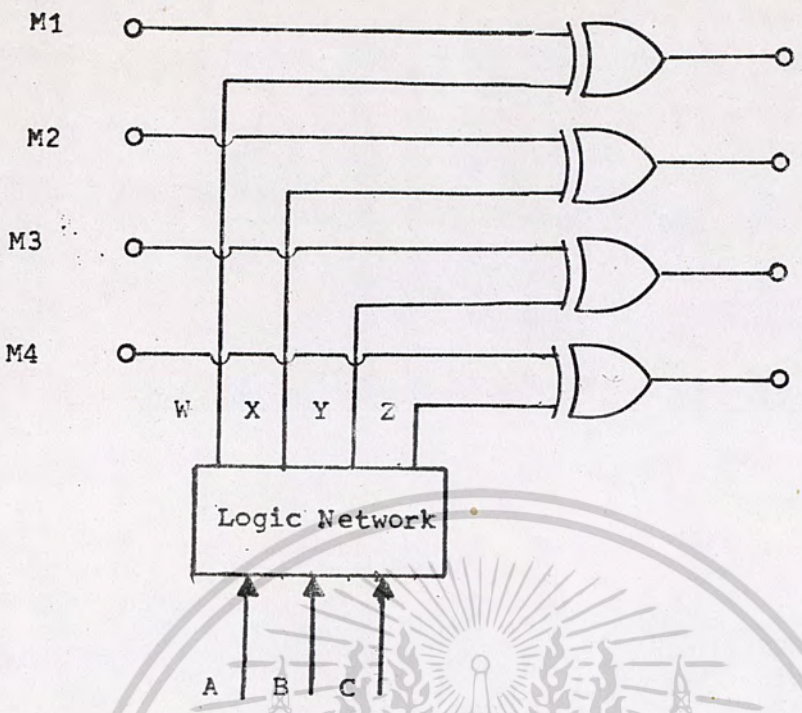
$$W = \bar{A}BC$$

$$X = A\bar{B}C$$

$$Y = AB\bar{C}$$

$$Z = ABC$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 วงจรตรวจสอบความผิดพลาด(Error-checking network)

รหัส(7,3) มีแฮม์มิ่งดีสแตนซ์เท่ากับ 3 สามารถทำ 1 ความผิดพลาดให้ถูกต้องแต่ถ้าหากเกิดความผิดพลาด ทั้งใน H1 และ H2 เอาท์พุทของการเช็คจะเป็น A=0 ,B=0 , C=1 ซึ่งเหมือนกับการเกิด 1 ความผิดพลาดใน C1 โดยที่โครงสร้างการเช็คจะไม่ให้ผล A=0,B=0,C=0 นั้นคือการถูกตรวจพบ 2 ความผิดพลาด แต่ผลอันนี้จะผิดพลาดหากใช้วงจรรูป 18 ดังนั้น รหัส (7,4) สามารถตรวจจับ 2 ความผิดพลาด หากเราให้รหัส (7,4)ออกแบบเพื่อทำ 1 ความผิดพลาดให้ถูกต้องเช่นการใช้ชิ้นงาน (hardware)ของรูปที่ 18 2 ความผิดพลาดจะถูกละเลย ดังนั้นในการทำงานของรหัส (7,4) เราจะต้องเปรียบเทียบ ความน่าจะเป็น ของ 2 ความผิดพลาดใน 7 ดิจิตกับ ความน่าจะเป็น ของ 1 ความผิดพลาดใน 4 ดิจิต หากเราใช้ อัตราข่าวสารเหมือนกัน แบนด์วีด จะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วน 7:4 ซึ่งจะเพิ่มค่าเฉลี่ยนอยส์ในปริมาณ 1.322

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรามาพิจารณา 2 ตัวอย่าง โดยอันแรกในกรณีไม่ใช้รหัส เราให้ความน่าจะเป็นของ ความผิดพลาด $P_e = 10^{-4}$ และในกรณี 2 $P_e = 10^{-5}$ ค่าความน่าจะเป็นของ 1 ความผิดพลาด ใน 4 ดิจิต จะเป็น $P_t = 4x10^{-4}$ หรือ $P_t = 4x10^{-5}$ ค่าเฉลี่ยสัญญาณรบกวนเพิ่มในอัตรา 1.322 ค่าความผิดพลาด ความน่าจะเป็นของระบบไม่ใช้รหัส จะเป็น

$$P_e' = 2.4x10^{-3} \quad \text{หรือ} \quad P_t' = 4x10^{-4}$$

ค่าความน่าจะเป็นของการไม่พบความผิดพลาด ในกรณีใช้รหัสจะเท่ากับความน่าจะเป็นของ 2 ความผิดพลาดหรือมากกว่า

$$P_t' = {}^7C_2(P_e)^2(1-P_e)^5 + {}^7C_3(P_e)^3(1-P_e)^4 + {}^7C_4(P_e)^4(1-P_e)^3 + {}^7C_5(P_e)^5(1-P_e)^2 + {}^7C_6(P_eO^6)(1-P_e) + {}^7C_7(P_e)^7$$

ซึ่งจะได้ว่า $P_t' = 1.29 \times 10^{-4}$ หรือ $P_t' = 8.36 \times 10^{-6}$

ในกรณีแรกอัตราการความผิดพลาดจะลดลงจาก $4x10^{-4}$ เป็น $1.29x10^{-4}$ (อัตราส่วน 3.1:1) และกรณีที่สองจาก $4x10^{-5}$ เป็น $8.36x10^{-6}$ (อัตราส่วน 4.7:1) เราจะเห็นได้ว่าคุณภาพของดีขึ้นโดยจะยิ่งดีขึ้นมากหากค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดยิ่งน้อยลง หากเราใช้ซิงเกิ้ลเออเลอร์ดีเทคติงก์ (single-error-detecting) ในรหัสที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น(เช่น 127,120 code)การลดค่าความน่าจะเป็นที่ไม่สามารถตรวจหาความผิดพลาดจะยิ่งมากขึ้น

หากเราต้องการ รหัสที่สามารถทำความผิดพลาด ให้ถูกต้องมากกว่าหนึ่ง ความผิดพลาดแฮม์มิ่งดีสแตนซ์จะต้องมากยิ่งขึ้นโดยค่าแฮม์มิ่งดีสแตนซ์ของดับเบิ้ลเออเลอร์คอเร็คติงก์โคด (double-error-correcting code) จะเป็น 5 คือในแต่ละค่ารหัสจะต้องแตกต่างจาก ค่ารหัส อื่น อย่างน้อย 5 ดิจิต หากเกิดความผิดพลาดขึ้น 2 ดิจิต ค่า ค่ารหัส ของเครื่องรับจะแตกต่างไปจาก รหัส ที่ถูกต้อง 2 ดิจิตและแตกต่างอย่างน้อย 3 ดิจิต กับค่ารหัส อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากมีการเกิดความผิดพลาดขึ้น y ความผิดพลาด ในแต่ละค่ารหัส หนทางที่จะเกิดความผิดพลาดเหล่านี้ได้ สามารถแสดงใน (m+c) ดิจิต คือ

$$\sum_{t=1}^{y} {}^{m+c}C_t$$

จำนวนcดิจิตกำหนด (2^c-1) แถวในเมตตริก ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง m และ c สำหรับรหัส ที่ต้องทำ y ความผิดพลาดให้ถูกต้อง คือ

$$\sum_{t=1}^{y} {}^{m+c}C_t \leqslant 2^c-1$$

ซึ่งเรียกว่าแฮม์มิ่ง บอดด์ (Hammingboud)โดยการทำความผิดพลาดให้ถูกต้องที่มีความผิดพลาดมากยิ่งขึ้นจะต้องใช้รหัสที่มีรีดันแดนซี่ มากยิ่งขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแฮม์มิ่ง ดีสแตนซ์ของรหัส กับจำนวนที่สามารถทำการหาความผิดพลาดได้แสดงดังตาราง 3 มีแฮม์มิ่งดีสแตนซ์ถึง 7

Hamming distance	Code properties
1	None
2	Single-error detecting
3	Single-error correcting or double-error detecting
4	Single-error correcting and double-error detecting
5	Double-error correcting or triple-error detecting
6	Double-error correcting and triple-error detecting
7	Triple-error correcting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3

2.8 <u>ทฤษฎีการตัดสินทางสถิติ</u> (Statistical Decision Theory)

ในการตัดสินและวิเคราะห์ว่าสัญญาณ M ชนิด ที่เป็นไปได้ที่ถูกส่งในระบบการติดต่อเชื่อมโยง (เช่นในระบบการสื่อสารแบบไบนารี่) M = 2 คือมีความเป็นไปได้ 2 อย่างคือ 0 กับ 1)ในเครื่องรับนั้นจะทำการสุ่มในช่วงสัญญาณทุกๆบิท และจะตัดสินว่าสัญญาณที่ถูกส่งมานั้นเป็น 0 หรือ 1 จะมีการเกิดความผิดพลาดได้ 2 อย่างคือ เครื่องรับตัดสินว่าสัญญาณที่รับเข้ามาได้เป็น 0 แต่จริง ๆ แล้วที่เครื่องส่ง,ส่ง 1 มา หรือในทางกลับกัน

ถ้าความน่าจะเป็นของความผิดพลาด มีค่าต่ำสุด ค่านี้จะเป็นค่าพื้นฐาน (base) ของความผิดพลาดทั้งสองชนิด

กฎการวิเคราะห์ คือ พื้นฐานของการตัดสินแยกโวลท์เตจ v ที่รับเข้ามาแยกเป็น 2 กลุ่ม คือ V_0 และ V_1 รอยเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มทั้งสองนี้ จะถูกเลือกตรงส่วนที่ทำให้เกิดความน่าจะเป็นความผิดพลาดรวมต่ำที่สุด ในการจะแสดงขบวนการกระทำอย่างนี้เราจะสมมติว่า P_0 แทนความน่าจะเป็น ของการส่ง 0 และ P_1 แทน ความน่าจะเป็นของการส่ง 1 แน่นอนว่า $P_0+P_1 = 1$

ค่า ความน่าจะเป็น ที่ v จะตกอยู่ในช่วง V_0 เมื่อ 1 ถูกส่งมาเป็น

$$\int_{V_0} P_1(v)\, dv$$

เมื่อ $P_1(v)$ คือค่าฟังก์ความหนาแน่นความน่าจะเป็นของโวลท์เตจ ที่รับได้เมื่อ 1 ถูกส่งมา และค่า ความน่าจะเป็น ที่ v จะตกอยู่ในช่วง V1 เมื่อ 0 ถูกส่งมาคือ

$$\int_{V_1} P_0(v)\, dv$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $P_o(v)$ คือค่าฟังก์ชั่นความหนาแน่นความน่าจะเป็นของโวลท์เตจที่รับได้เมื่อ 0 ถูกส่งมา ดังนั้น ความน่าจะเป็น ของ ความผิดพลาด ทั้งหมดจะเป็น

$$Pe = P_o \int_{V_1} p_o(v)dv + P_1 \int_{V_o} p_1(v)dv \qquad (1)$$

พื้นที่ V_o+V_1 ครอบคลุมค่าทั้งหมดของ v ดังนั้น

$$\int_{V_o+V_1} p_1(v)dv = \int_{V_o} p_1(v)dv + \int_{V_1} p_1(v)dv = 1$$

ดังนั้นเราสามารถแยกแยะการอินติเกรทบนค่า V_o จากสมการ (1) ได้เป็น

$$Pe = P_1 + \int_{V_1} [P_o p_o(v) - P_1 p_1(v)]dv \qquad (2)$$

ถ้าเรารู้ P_1 เราสามารถทำให้ P_o น้อยที่สุดโดยการทำ อินติเกรท สมการ (2) ทางลบและมากที่สุดเท่าที่เป็นได้ คือ

$$P_1 p_1(v) > P_o p_o(v)$$

จะได้กฎการวิเคราะห์ (decision rule) เป็น

$$\frac{p_1(v)}{p_o(v)} > \frac{P_o}{P_1} \qquad (3)$$

$$\lambda = p_1(v)/p_2(v)$$

λ รู้จักในนามอัตราส่วนไลค์ลิฮูด (likelihood ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของไบนารี่ ถ้า 0 ทำโดยใช้ ศูนย์ โวลท์ และ 1 แทนโดยใช้ A โวลท์และ สัญญาณรบกวนเป็นแบบ เกาซ์เซียน แล้ว ฟังก์ชั่นความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของ ทั้งสองจะเป็น

$$p_o(v) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{1/2}} \exp\left[-(v)^2/2\sigma^2\right] \qquad (4)$$

$$p_1(v) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{1/2}} \exp\left[-(v-A)^2/2\sigma^2\right]$$

บริเวณ V_1 ถูกกำหนดโดยค่าทั้งหมดของ v ซึ่ง $> P_o/P_1$ คือ

$$\frac{\exp\left[-(v-A)^2/2\sigma^2\right]}{\exp\left[-v^2/2\sigma^2\right]} > \frac{P_o}{P_1} \qquad (5)$$

ใส่ล็อคกะริทึม(take log) สมการ (5) ได้

$$V^2-(V-A)^2 > 2\sigma^2 \ln P_o/P_1$$

บริเวณ V_1 ที่คำนวณได้จะมีลักษณะ

$$V > \frac{A}{2} + \frac{\sigma^2}{A} \ln \frac{P_o}{P_1} \qquad (6)$$

หรือจุดต่อระหว่าง V_o และ V_1 คือ

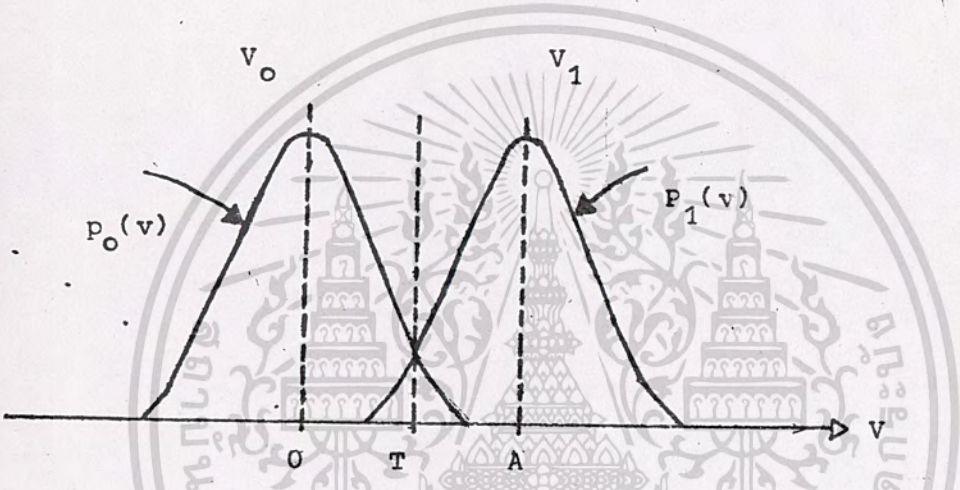
$$T = \frac{A}{2} + \frac{\sigma^2}{A} \ln \frac{P_o}{P_1} \qquad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

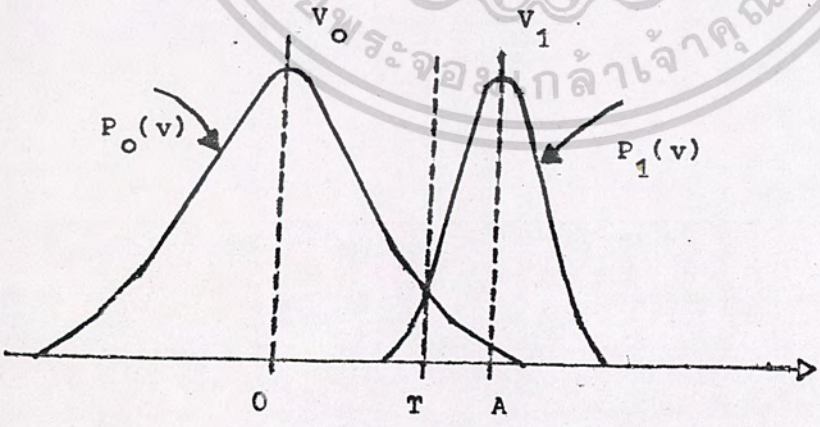
ถ้า ไบนารี่ 1 และ 0 มีความเป็นไปได้เท่ากัน ค่าดีซีสชั่น เทรสโฮลด์ จะได้

$$T = A/2$$

ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งพอดีระหว่าง ระดับ โวลท์เตจ ที่แทน 1 และ 0 หาก 0 ถูกส่งไปมากกว่า 1 ค่า เทรสโฮลด์ จะขยับเข้าใกล้ V_1 แสดงได้ดังรูป 19



เทรสโฮลด์ เมื่อ $P_0 = P_1$



เทรสโฮลด์ เมื่อ $P_0 > P_1$

รูปที่ 19 ระดับเทรสโฮลด์ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่า ดีซีสชั่น เทรสโฮลด์ วิธีหนึ่งคือ คำนวณจากความน่าจะเป็นของความผิดพลาดรวม หากไบนารี่ 0 ส่งไป, ค่าความน่าจะเป็นที่จะรับได้เป็น 1 คือค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณรบกวน จะมีค่ามากกว่า +A/2 โวลท์ (สมมติ $P_0=P_1$) ได้

$$P_{e0} = \int_{A/2}^{\infty} \frac{\exp(-v^2/2\sigma^2)}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}}\, dv \qquad (8)$$

ถ้าเราส่ง 1 (A volts) ค่าความน่าจะเป็น ที่จะรับได้เป็น 0 คือค่าความน่าจะเป็นที่โวลท์เตจของสัญญาณรบกวน (noise voltage) จะอยู่ในช่วง -A/2 และ $-\infty$ ได้ว่า

$$P_{e1} = \int_{-\infty}^{-A/2} \frac{\exp(-v^2/2\sigma^2)}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}}\, dv \qquad (9)$$

ความผิดพลาดเหล่านี้คือ มิวชวลลี่ เอ็กคลูซีฟ(mutually exclusive) คือค่าที่ส่งเป็น 0 แต่ผลจากการส่งเป็น 1 เพราะว่าการเท่ากันของ ฟังชั่นเกาซ์เซี่ยน $P_{e0} = P_{e1}$ และผลรวมของ error ความน่าจะเป็น ซึ่งคือ $P_0P_{e0} + P_1P_{e1}$ สามารถเขียนได้ในรูป

$$P_e = P_{e1}(P_0 + P_1) = P_{e1}$$

ได้ว่า

$$P_e = \int_{-\infty}^{-A/2} \frac{\exp(-v^2/2\sigma^2)}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}}\, dv \qquad (10)$$

สมการนี้สามารถเขียนอยู่ในรูป อินติเกรท 2 เทอม

$$P_e = \int_{-\infty}^{0} \frac{\exp(-v^2/2\sigma^2)}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}}\, dv - \int_{-A/2}^{0} \frac{\exp(-v^2/2\sigma^2)}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}}\, dv \qquad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้การกระจายแบบ เกาซ์เซี่ยน คือค่า mean ที่เท่ากันสมการ (11) เขียนได้เป็น

$$P_e = \frac{1}{2} + \int_{0}^{-A/2} \frac{\exp(-v^2/2\sigma^2)}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)}}\, dv$$

หากเราให้ $y = v/(2^{2})$ จะได้

$$P_e = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{A/(2\sqrt{2}\sigma)} \exp(-y^2)\, dy$$

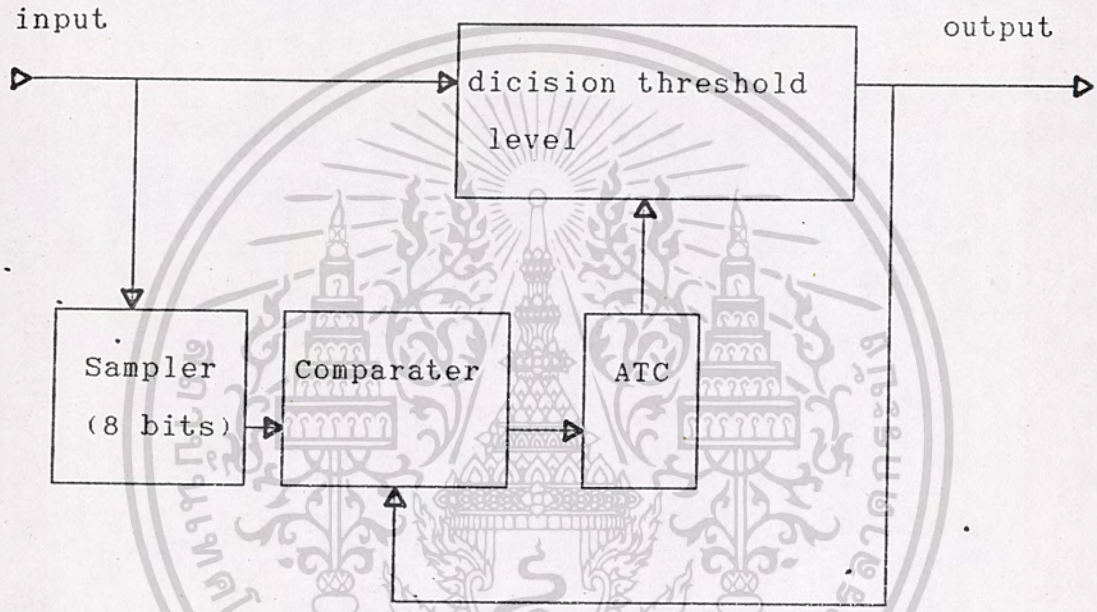
ก็คือ

$$P_e = \frac{1}{2} \{ 1 - \mathrm{erf}\, [A/(2\sqrt{2}\sigma] \} \qquad (12)$$

ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดจะมีผลขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสัญญาณโวลเตจ A สูงสุดต่อโวลท์เตจของสัญญาณรบกวนเฉลี่ย(rms noisevottage) สำหรับค่าของ A/σ อยู่ที่ราว 18 dB และค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่ 10^{-5} มักจะเป็นค่าที่ยอมรับกันในการใช้งาน ระบบสื่อสารข้อมูล ค่าแอมปลิจูดของ พัลซ์(Pulse)ที่ลงรอยกันจะเป็น 10 เท่าของ ค่าโวลต์เตจของสัญญาณรบกวนเฉลี่ย

จากคุณสมบัติของการเลือกระดับ เทรสโฮลด์ ที่เหมาะสมกับไบนารี่ที่ส่งมาจะสามารถช่วยลดค่า ผิดพลาดที่เกิดที่เครื่องรับได้ ดังนั้น ถ้าเราปรับให้ระดับ ดีซีสชั่นเทรสโฮลด์ เปลี่ยนไปตามกลุ่มไบนารีที่เข้ามา จะมีผลให้เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูล โดยลักษณะของตัวควบคุมระดับเทรสโฮลด์ จะทำการเปลี่ยนค่า ระดับ ดีซีสชั่น เทรสโฮลด์ โดยอาศัยกลุ่มไบนารีที่เข้ามาเป็น อินพุทที่ป้อนให้เครื่องควบคุมนี้ ทำงานซึ่งเราจะเรียกตัวควบคุมนี้ว่า ตัวควบคุมเทรสโฮลด์อัตโนมัติ (Automatic Threshold Control (ATC)) สามารถแสดงเป็น แผนภูมิแบบบล็อค(block diagram) ดังรูปที่ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 ตัวควบคุมเทรสโฮลด์อัตโนมัติ (ATC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระบบที่ใช้ในการทดลอง

ระบบสื่อสาร 8 Mbit/s FIBER OPTICS TRANSMISSION SYSTEM

ในปัจจุบันนี้ ระบบสื่อสารแบบดิจิตอลได้มีการพัฒนาขึ้นมากเพื่อเพิ่มอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล ซึ่งแบ่งการพัฒนาออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

#1 แบบญี่ปุ่น

#2 แบบยุโรป

#3 แบบอเมริกา

ระบบการสื่อสารทางดิจิตอลที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นแบบยุโรปดังรูปที่ 21 และรูปที่ 22 คือรูประบบที่ใช้ในการทดลองซึ่งระบบที่ใช้นี้จะทำการรับสัญญาณข้อมูลที่เป็นแบบสัญญาณต่อเนื่อง(Analog) จากชุมสาย โทรศัพท์ และทำการเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลต่อเนื่องให้เป็นแบบดิจิตอลดังรูป ซึ่งก็คือส่วนที่เป็น 2 MUX ของระบบสัญญาณข้อมูลที่ออกจากส่วนนี้ จะมีอัตราความเร็ว 2.048 Mbit/s.จากนั้นสัญญาณจะเข้าสู่ระบบส่วนที่เป็น 8 MUX เพื่อทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณของทั้ง4 ช่องสัญญาณที่เข้ามาด้วยอัตราเร็ว2.488 Mbit/s ต่อช่อง และส่งออกไปสู่ระบบทางด้านการส่ ออฟติคัลไฟเบอร์ (Optical Fiber) ด้วยความเร็วของข้อมูล 8.448 Mbit/s.

ทางด้านของเส้นใยแสง จะทำการแปลงสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าให้เป็นแบบแสงและทำการส่งผ่านไปในสายส่งที่เป็นแบบเส้นใยแสง ส่วนทางด้านรับจะทำการเปลี่ยนสัญญาณแสง ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าดังเดิมจากนั้นจะทำการดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplex) และทำการถอดรหัส(Decode)สัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณต่อเนื่องดังเดิม ให้เหมือนกับสัญญาณที่ถูกส่งมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

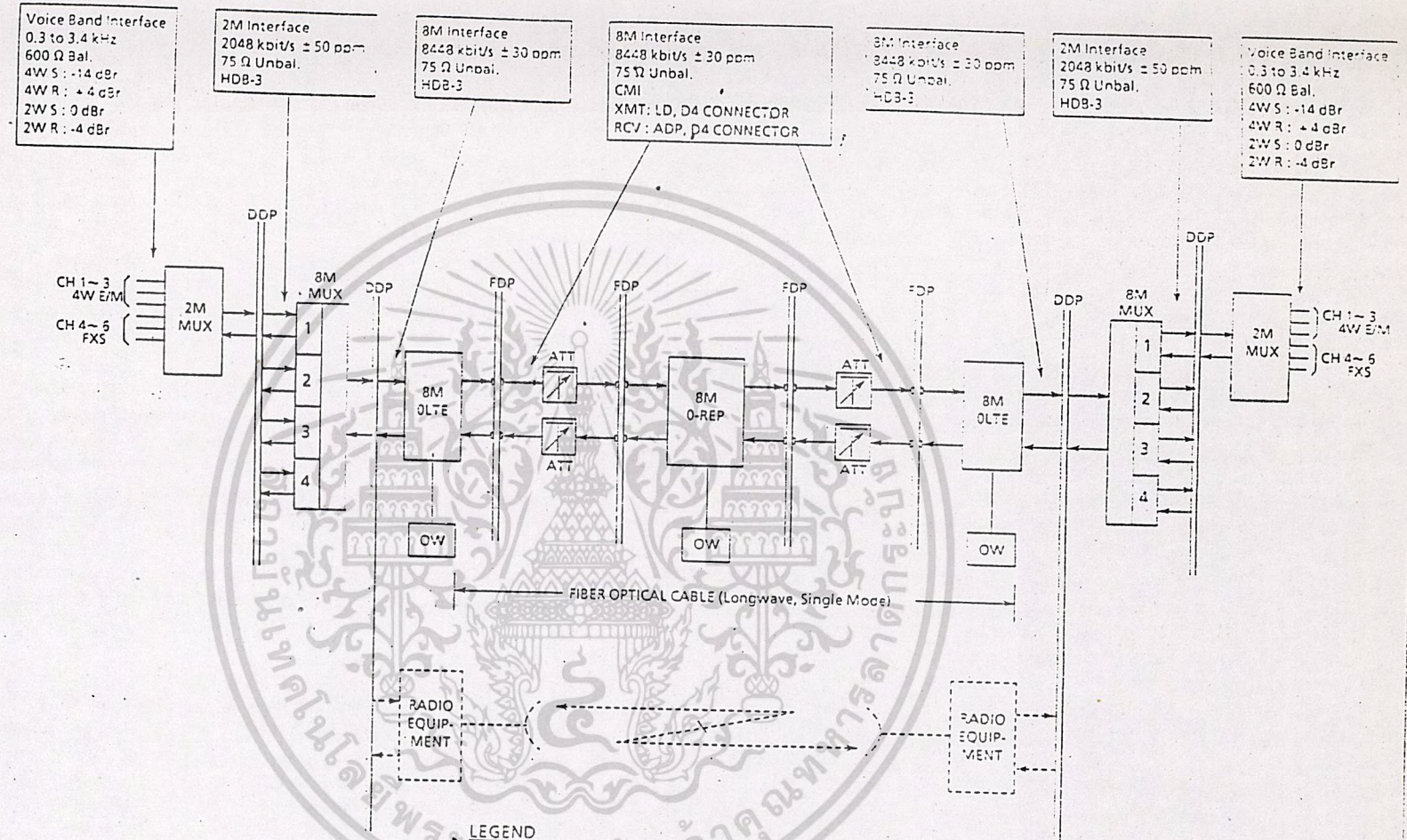
Country	Digital Stage				
	Primary	Secondary	3rd Order	4th Order	5th Order
Japan (NTT)	24 x4 96 x5 480 x3 1,440 x4 5,760	1.544Mb/s (G711, G712, G733)	6.312MB/s (G741, G743)	32Mb/s (G752)	97Mb/s	397Mb/s
U.S.A. & Canada	24 x4 96 x7 672 x6 4,032	1.544Mb/s (G711, G712, G733)	6.312Mb/s (G741, G743)	45Mb/s (G752)	274Mb/s	
Europe	30 x4 120 x4 480 x4 1,920 x4 7,680	2.048Mb/s (G711, G712, G732)	8.448Mb/s (G741, G742)	34Mb/s (G751)	140Mb/s (G751)	565Mb/s

Note: Digit in circle means equivalent number of telephone channel.

: Digit in parentheses means CCITT Recommendation.

รูปที่ 21 รูปแบบการพัฒนาการสื่อสารแบบดิจิตอล

ISSUE
No. DATE
1 NOV.29,1988
2
3
4
5



LEGEND

2M MUX	:	2Mbps Multiplexer
DDP	:	Digital Distribution Panel
8M MUX	:	8Mbps Multiplexer
8M OLTE	:	8Mbps Optical Line Terminating Equipment
FDP	:	Fiber Distribution Panel
ATT	:	Programmable Attenuator (10 dB)
8M O-REP	:	8Mbps Optical Repeater (Office Type)
OW	:	Orderwire Equipment

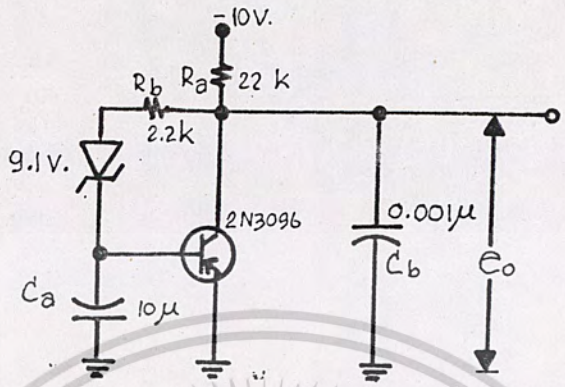
รูปที่ 22

SYSTEM CONFIGURATION
OF
8 Mbit/s FIBER OPTICS
TRANSMISSION SYSYEM FOR
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF
TECHNOLOGY OF THAILAND

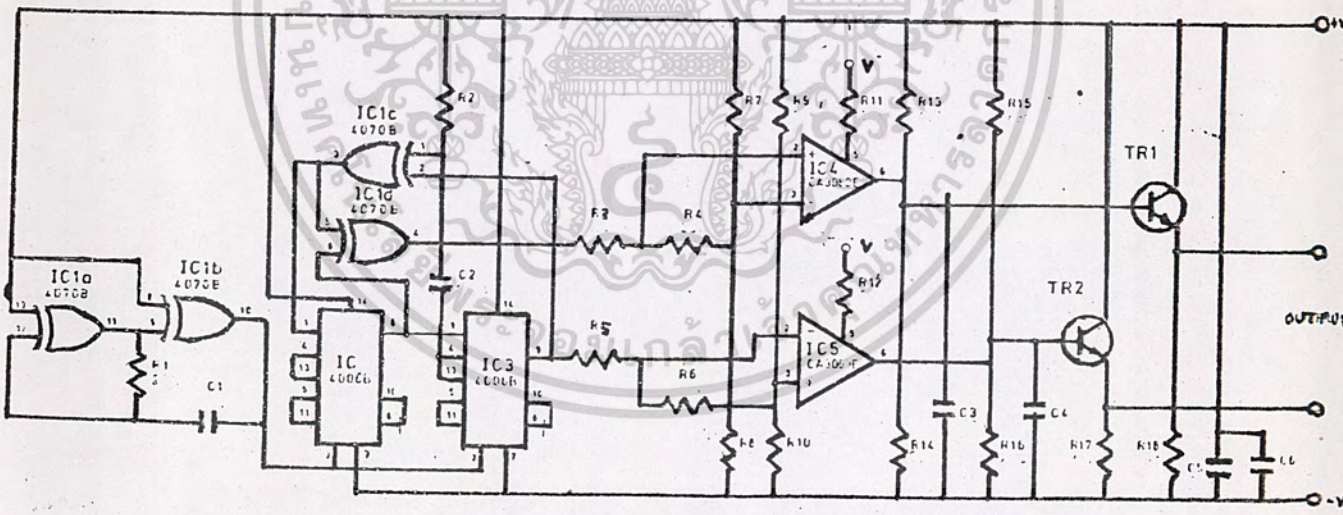
FILM
AP ROLL
LIMIT
SCALE!
ENG. S. Tanada
DRD. S. Izumo
APP.
REF. No.
DIST.
NEC

จากรูปที่ 23 สัญญาณนาฬิกา(clock)ของ IC_{1a} และ IC_{1b} ซึ่งต่อกันมีความถี่ประมาณ 1 MHz ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมสัญญาณนาฬิกา ที่เป็นอินพุท (input)ให้กับขา 3ของทั้ง IC_2 และ IC_3 ที่ เอาท์พุทจากของ 4 ลำดับสถานะ(stage)แรกใน IC_2 จะนำมาจากขาที่ 8 ตรงไปยัง อินพุทของ IC_3 ที่ขา 1 ที่ เอาท์พุท จาก IC_3 ที่นำมาจากขา 9 และ EX-OR กับ เอาท์พุทจากลำดับสถานะ ที่ 20 จากขา 4 และ 13 โดย IC_{1c} โดย เอาท์พุท จากขานี้จะผ่านกลับไปยัง อินพุท ของ $IC_{2,3}$ ขาที่ 1 มันจะไปยัง IC_{1d} เมื่อมันเป็น EX-OR กับที่มาจากขา 16,8 ของ IC_2 จะให้ เอาท์พุท อันที่ 2 ส่วน gain ที่ปรับได้ซึ่งประกอบไปด้วยคู่ของทรานซ์คอนดักแตนซ์ออปแอมป์ (Transconductance op-amps)ของ IC_4 และ IC_5 ที่ขั้วของเอาท์พุท ของสิ่งนี้จะขึ้นอยู่กับ อินพุท แต่กระแสเอาท์พุท จะขึ้นกับกระแสไบอัสที่ป้อนให้ขา 5 ในกรณีนี้ผ่าน R_{11} และ R_{12} ส่วนที่เอาท์พุทจะถูกแบ่งครึ่งจากแหล่งจ่ายไฟ(Supply Voltage)โดยลำดับของ R_{13},R_{14},R_{15} และ R_{16} ดังนั้นแอมปลิจูด ของเอาท์พุท จะสมมาตรกับระดับศูนย์กลางของแหล่งจ่ายไฟ(Supply Voltage) กับ แอมปลิจูด ที่บังคับโดยโวล์ทเตจ (Voltage)ที่แปรกับ R_{11} และ R_{12} อย่างไรก็ตาม เอาท์พุท ที่จุดนี้จะข้ามระหว่าง 2 ระดับซึ่งการทำรูปร่างของมันให้ออกมาเป็น สัญญาณรบกวนที่ต่อเนื่อง (Analog noise) จริงจะต้องอาศัยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter)ช่วยซึ่งสามารถใช้วงจรกรอง(filter) ธรรมดาที่ประกอบด้วย C_3 และ C_4ซึ่งให้ช่วงความถี่อยู่ที่ราว 15 kHz สิ่งนี้ทำให้ช่วงกว้างของสัญญาณรบกวน (noise bandwidth) ครอบคลุมช่วงความถี่เสียง(audio band)ในขั้นสุดท้ายเพราะ เอาท์พุท เป็น ไฮท์อิมพิแดนซ์ (High impedance)จึงต้องบัฟเฟอร์(Buffered) ด้วย ทรานซิสเตอร์ TR_1 และ TR_2 ส่วน C_5 และ C_6จะเป็นตัวกั้น ตัวจ่าย(Supply) กับ วงจร(Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ZENER DIODE SHOT NOISE



PSEUDO RANDOM NOISE

รูปที่ 23 รูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

components

RESISTER

R_1	27k
R_2	1M
R_3 to R_6	22k
R_7 to R_{10}	10k
R_{11} , R_{12}	33k
R_{13} to R_{16}	47k
R_{17} , R_{18}	4k7

all 0.6 W metal film type

capaciters

C_1	10pF ceramic
C_2,C_6	100n miniature polyester layer
C_3,C_4	470pF polystyrene
C_5	100μF radial lead elect.25V

SEMICONDUCTERS

TR_1,TR_2	BC184L silicon *npn*
IC_1	4070B CMOS quad Exclusive-OR gate
IC_2,IC_3	4006B CMOS shift registers
IC_4,IC_5	CA3080E transconductance amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลอง

4.1 วัตถุประสงค์

ศึกษาการวัดเพื่อหาคุณลักษณะของ bit error rate (ber) ในระบบการส่งสัญญาณ เมื่อมีสัญญาณรบกวน(noise)เข้าในระบบ ซึ่ง berเป็นปริมาณในการแสดงคุณภาพของระบบสญญาณแบบดิจิตอล

4.2 เครื่องและอุปกรณ์

- ME520B ดิจิตอลทรานสมิชชั่นอนาไลเซอร์
- MN932A ออฟติคัลแอทเทนนิวเอเตอร์
- MN931A ออฟติคัลสวิทช์
- ML93A ออฟติคัลพาวเวอร์มิเตอร์
- D4 ออฟติคัลอะแด็ปเตอร์
- สายวัดต่างๆ

4.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.3.1 ต่อวงจรดังรูปที่ 24 ตั้งและปรับอุปกรณ์เครื่องมือวัด

4.3.2 ตั้งและปรับเอาพุทท์วงจรNOISE GENERATOR ให้คงที่

4.3.3 ต่อขั้ว G ระหว่างอุปกรณ์เครื่องมือวัดและ 8M MUX

4.3.4 ผลักสวิทช์ "LDSOINH" และ "MAINT" ของ 8M OLTE ที่สถานี Aไปทางด้านบน

4.3.5 หมุนสวิทช์ของ MN931A ไปทาง B

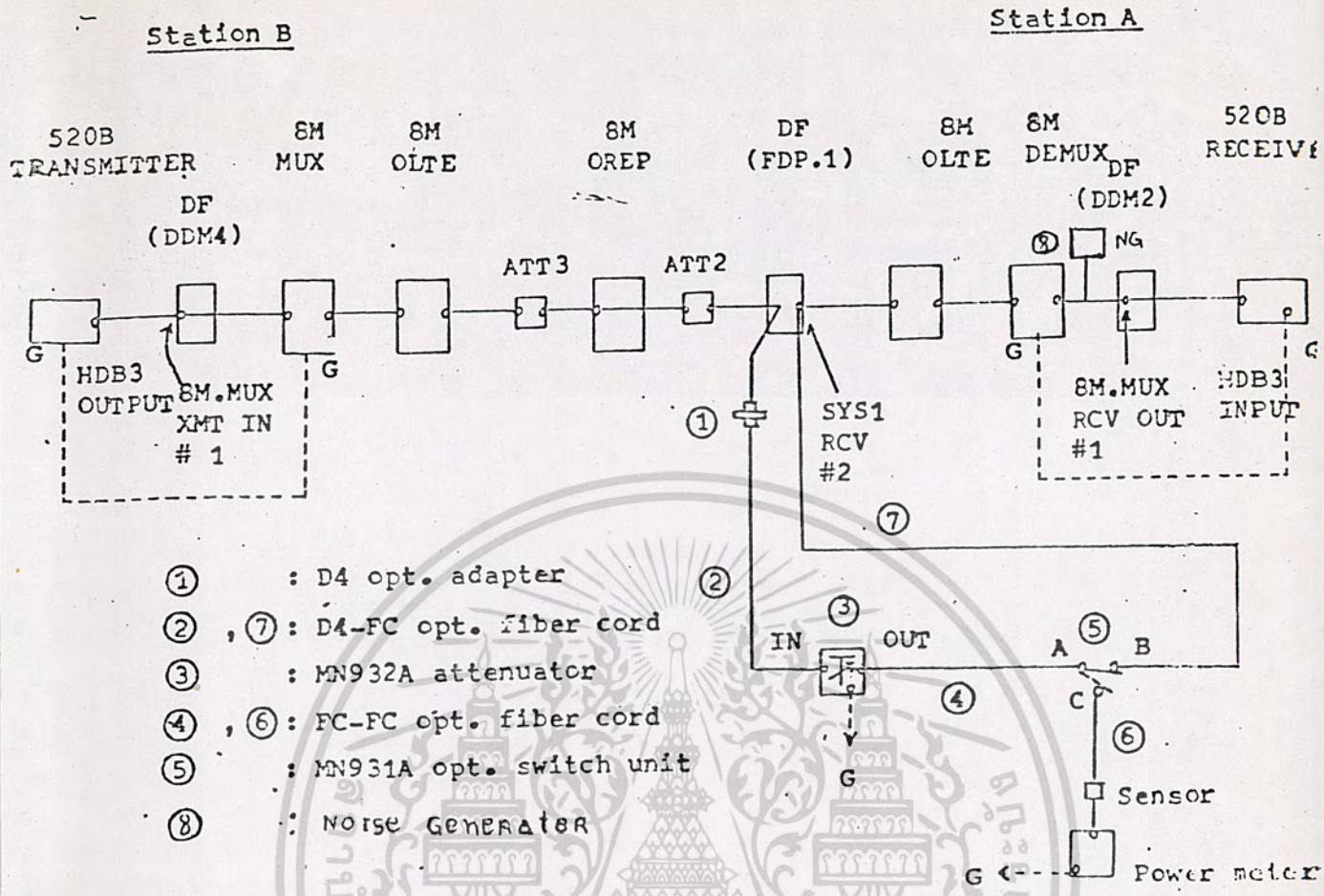
4.3.6 กดคีย์ "START/STOP" ของ ME520B ขณะนี้การวัดจะเริ่มต้นและจำนวนของการผิดพลาดจะแสดงบนตำแหน่ง ERROR INDICATOR ของ ME520B

4.3.7 เมื่อหมดเวลาการวัด LED ที่แสดงการนับเวลาก็จะดับอ่านจำนวนบิทที่ผิดพลาด ถ้า E=0 ให้เปลี่ยนเวลาการวัดเป็น 10 นาที

4.3.8 หมุนสวิทช์ของ MN931A ไปทาง "C" แล้วอ่านค่าพาวเวอร์

4.3.9 เปลี่ยนค่าของออฟติคัลแอทเทนนิวเอเตอร์แล้วทำการวัดจากข้อ 5-8 พร้อมทั้งอ่านค่าของจำนวนผิดพลาดและพาวเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 24 วงจรการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ผลจากการแทรก PSEUDO RANDOM NOISE
ที่ใช้เวลาในการวัด 1 นาที

ATTENUATOR (dB)	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5
MEASUREMENT PERIOD (SEC)	60	60	60	60	60	60	60	60
POWER METER INDICATION (dBm)	-45.04	-45.37	-45.60	-46.17	-46.46	-46.69	-47.18	-47.54
BIT ERROR RATE	0	0	0	2.03E-7	1.76E-6	1.94E-6	1.66E-5	5.5E-4

ตารางผลจากการแทรก PSEUDO RANDOM NOISE
ที่ใช้เวลาในการวัด 10 นาที

ATTENUATOR (dB)	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5
MEASUREMENT PERIOD (SEC)	600	600	600	600	600	600	600	600
POWER METER INDICATION (dBm)	-45.04	-45.37	-45.60	-46.17	-46.46	-46.69	-47.18	-47.54
BIT ERROR RATE	0	0	0	8.3E-7	4.5E-6	6.85E-6	3.66E-5	2.5E-3

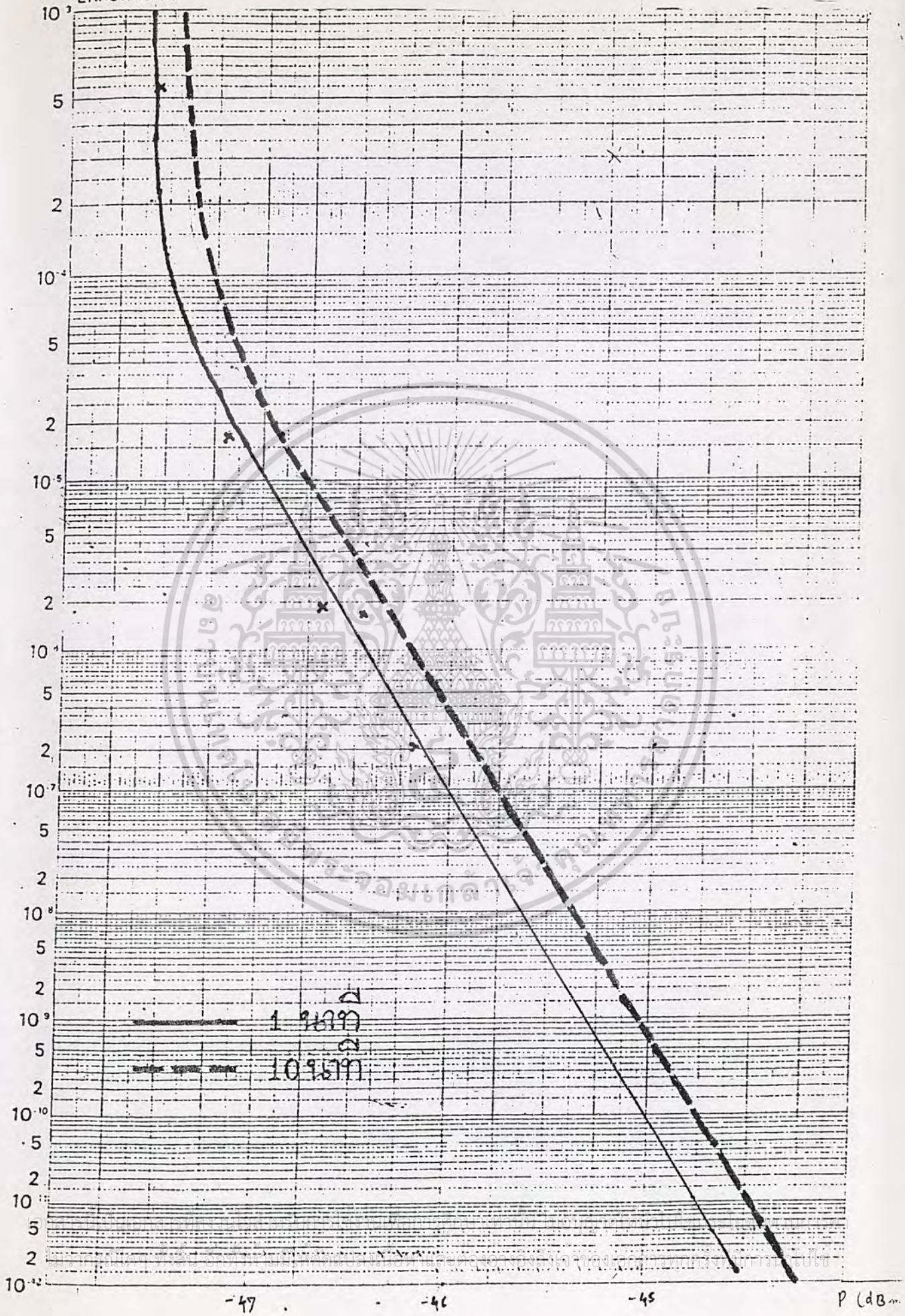
ตารางผลจากการแทรก ZENER DIODE SHOT NOISE
ที่ใช้เวลาในการวัด 1 นาที

ATTENUATOR (dB)	10	11	12	13	14	15	16	17
MEASUREMENT PERIOD (SEC)	60	60	60	60	60	60	60	60
POWER METER INDICATION (dBm)	-40.61	-41.41	-42.21	-43.18	-43.69	-43.92	-44.74	-46.29
BIT ERROR RATE	1.26E-5	2.06E-5	2.23E-5	2.72E-5	4.29E-5	6.37E-5	1.56E-4	4.41E-3

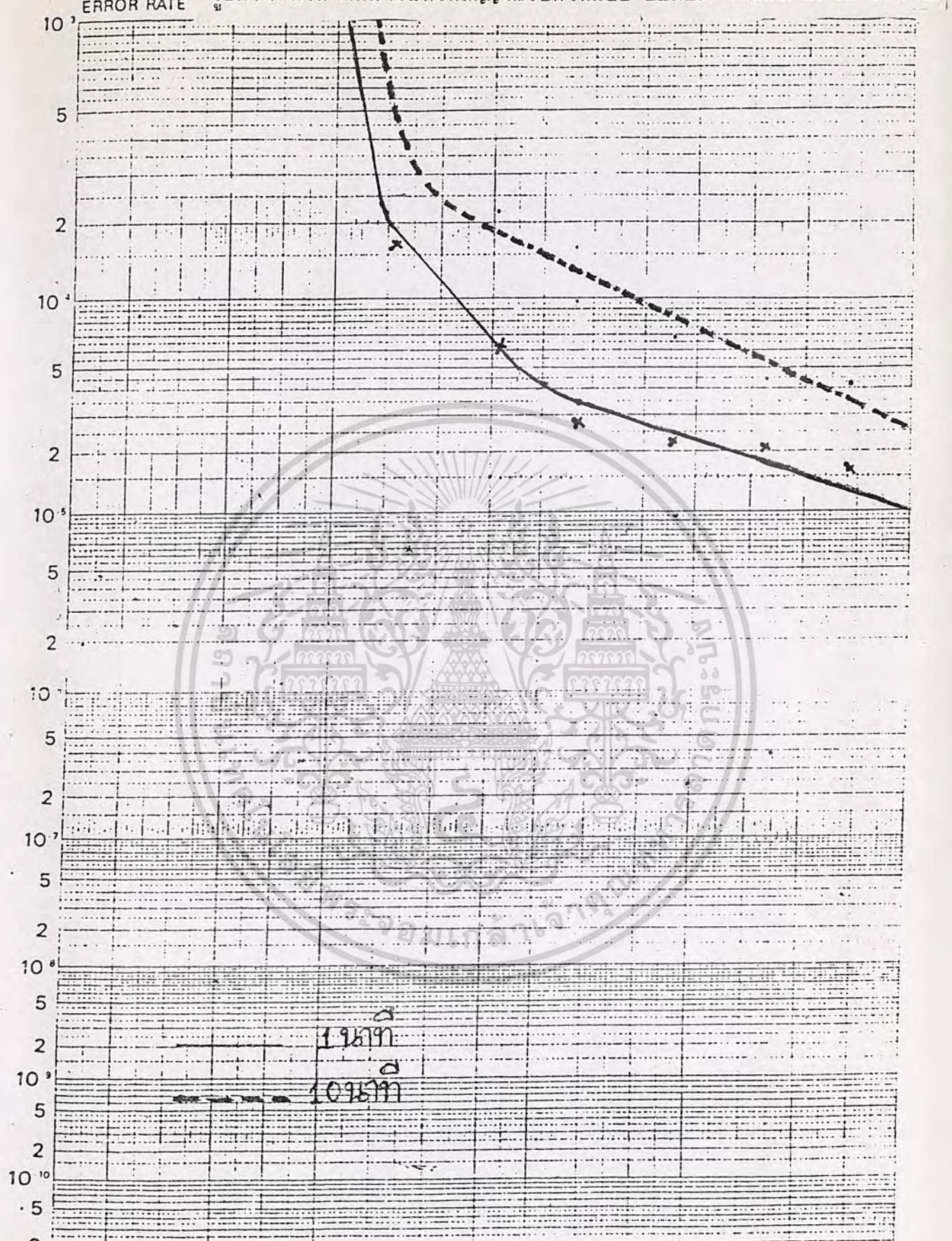
ตารางผลจากการแทรก ZENER DIODE SHOT NOISE
ที่ใช้เวลาในการวัด 10 นาที

ATTENUATOR (dB)	10	11	12	13	14	15	16	17
MEASUREMENT PERIOD (SEC)	600	600	600	600	600	600	600	600
POWER METER INDICATION (dBm)	-40.61	-41.41	-42.21	-43.18	-43.69	-43.92	-44.74	-46.29
BIT ERROR RATE	4.27E-5	4.46E-5	6.69E-5	9.57E-5	1.24E-4	2.27E-4	2.4E-4	8.41E-3

รูปกราฟที่ได้จากการแทรกสัญญาณรบกวนแบบ PSEUDO RANDOM NOISE



รูปกราฟที่ได้จากการแทรกสัญญาณรบกวนแบบ ZENER DIODE SHOT NOISE



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

จากการทดลอง เมื่อทำการแทรกสัญญาณรบกวน เข้าสู่ระบบโดยเซ็ทให้ระดับสัญญาณรบกวน คงที่ และทำการปรับเปลี่ยน ขนาดการลดทอนสัญญาณ (ATTENUATION) ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะทางของสายส่งสัญญาณข้อมูล โดยที่การเพิ่มขนาดการลดทอนเหมือนเป็นการเพิ่มระยะทางสายส่ง ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สายเส้นใยแสง (OPTICAL FIBER)

การทำเช่นนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนกับขนาดสัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอล เมื่อมีขนาดของสัญญาณลดลง(ลดลงเพราะระยะทางการส่งไกลขึ้น)ซึ่งแสดงออกมาในรูป บิทเออเลอร์เรท(BIT ERROR RATE /BER) โดยสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูป

จากกราฟสามารถวิเคราะห์ได้ว่า BER แปรผันโดยตรงกับขนาดสัญญาณข้อมูลที่ลดลงและขนาดสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้น และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในระบบจะมีผลกระทบต่อระบบ มากกว่า สัญญาณรบกวนที่เกิดจากนอกระบบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบ ส่วนต่าง ๆ ที่มีโอกาศทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลจะพบว่า ส่วนที่มีผลอย่างมากคือส่วนที่ตัดสินว่าบิทข้อมูลที่รับเข้ามาเป็นรหัสแทนบิท 1 หรือ 0 โดยระดับที่ใช้ในการตัดสินคือระดับเทรสโฮลด์(THRESHOLD LEVEL)เป็นตัวแปรที่สำคัญกับค่า บิทเออเลอร์เรท เป็นอย่างมากหากเราตั้งระดับเทรสโฮลด์ที่เหมาะสมกับกลุ่มบิทข้อมูล จะทำให้ได้ผลการเกิดค่าบิทเออเลอร์เรทต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMI, HDB3 bit error measurement (PRBS pattern)

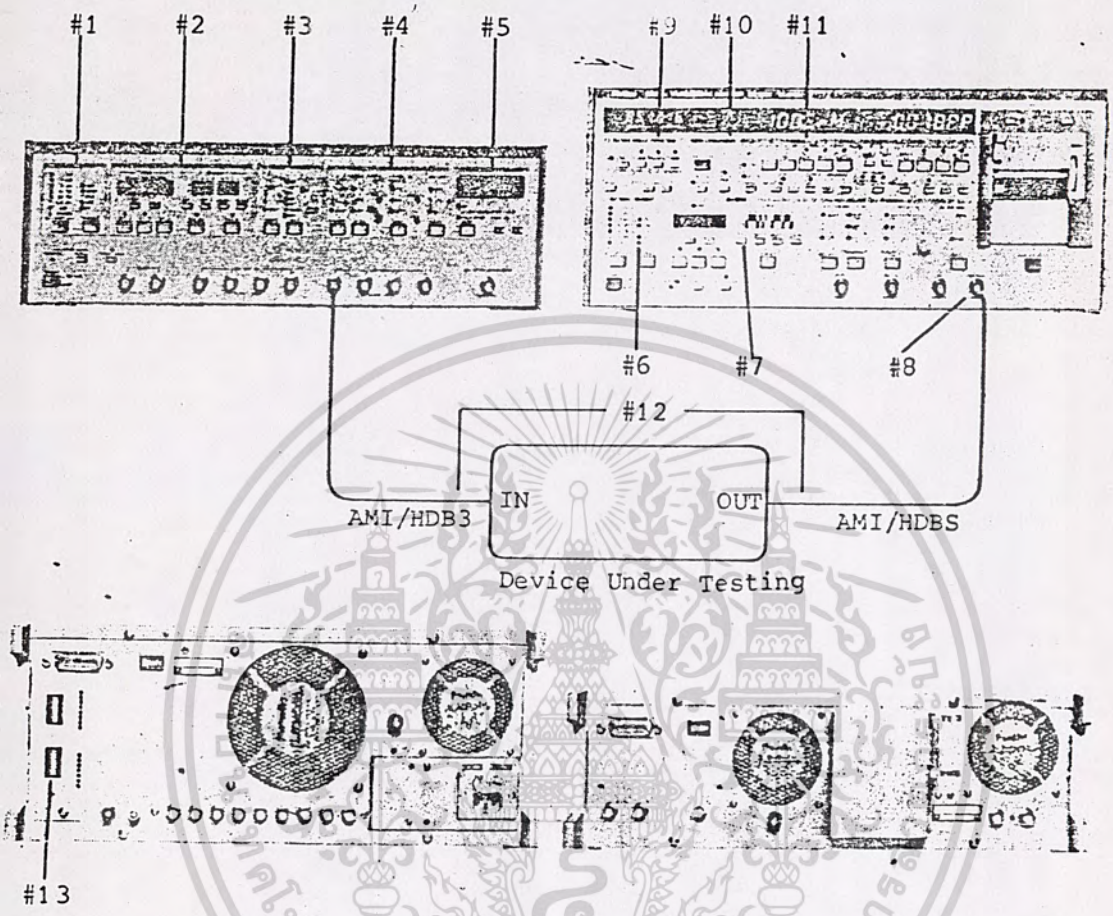


Fig. 3-8 AMI, HDB3 Bit Error Measurement

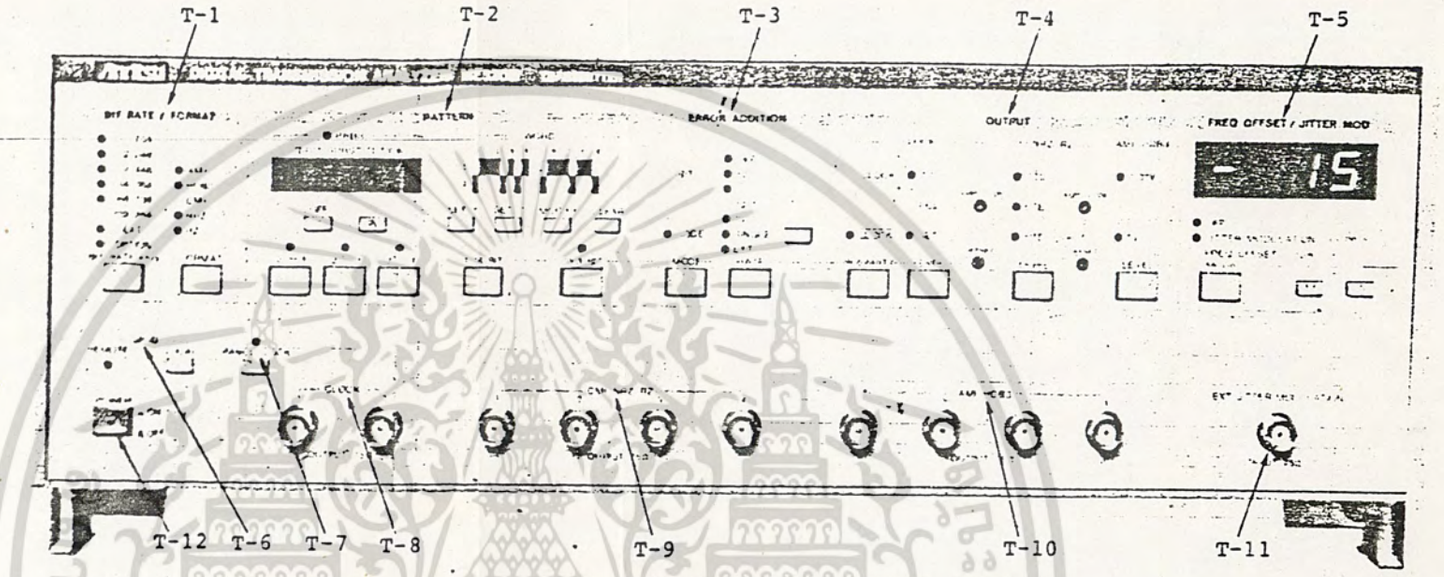
Step	Procedure
(Transmitter)	
#1.	Set [BIT RATE] to 704, 2048, 8448, or 34368 kb/s. Set [FORMAT] to AMI or HDB3.
#2.	Set PATTERN to PRBS [2^{15}-1] or [2^{23}-1]. When zero substitution is necessary, use the [⩓] key.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(cont.)

Step	Procedure
#3	Set ERROR ADDITION to BIT using the [MODE] switch, and OFF using the [RATE] switch.
#4	Set OUTPUT LEVEL to 2.37 V for 8448 kb/s or less, and to 1 V for 34368 kb/s.
#5	Set FREQ OFFSET/JITTER MOD to normal OFF using the [MODE] switch.
(Receiver)	
#6	Set BIT RATE using [RECOVERY] to the same value as the transmitter.
	Set [FORMAT] to the same value as the transmitter.
#7	Set PATTERN to the same value as the transmitter.
#8	Set INPUT to TERM using the [MODE] switch.
#9	Set GATING PERIOD to [TIME], [CLOCK], or [MAN]. For TIME and CLOCK, use the [∨] and [∧] keys to set the necessary period.
#10	MEAS/EVALUATION
	Select SINGLE or REPEAT.
	Select LAST DATA or CURRENT DATA, depending upon the measurement.
#11	Set ERROR MODE to BIT.
	Set SYNC to AUTO.
	Select one of the four display modes under DISPLAY MODE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



o: lit lamp (example)

Fig. 3-1 Transmitter Front Panel

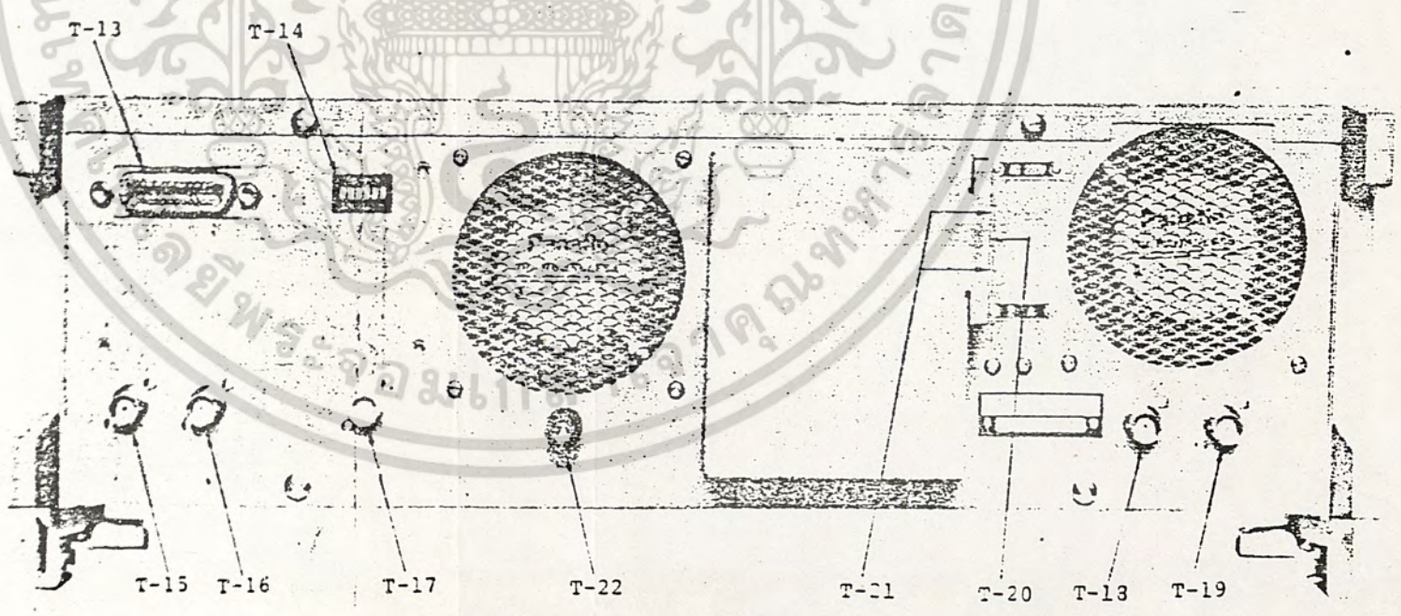
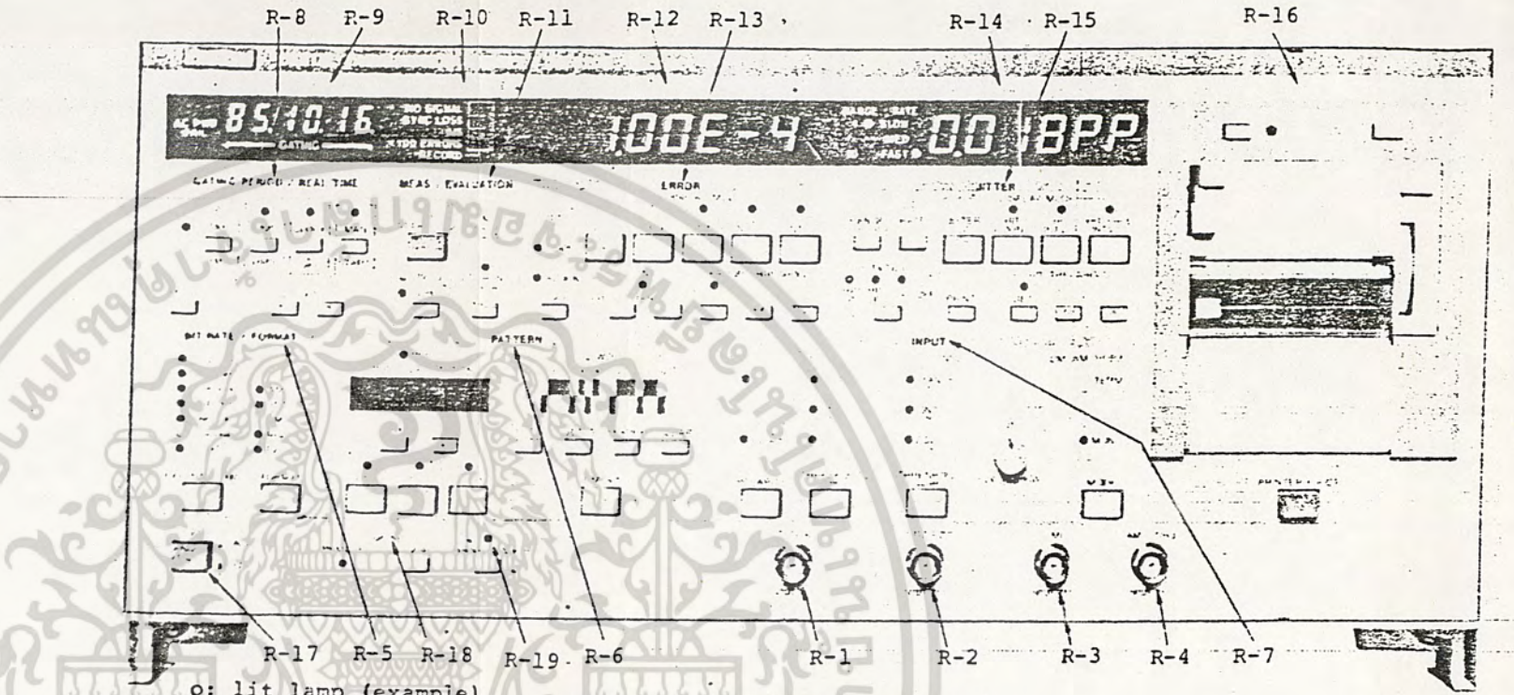


Fig. 3-2 Transmitter Rear Panel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



o: lit lamp (example)

Fig. 3-3 Receiver Front Panel

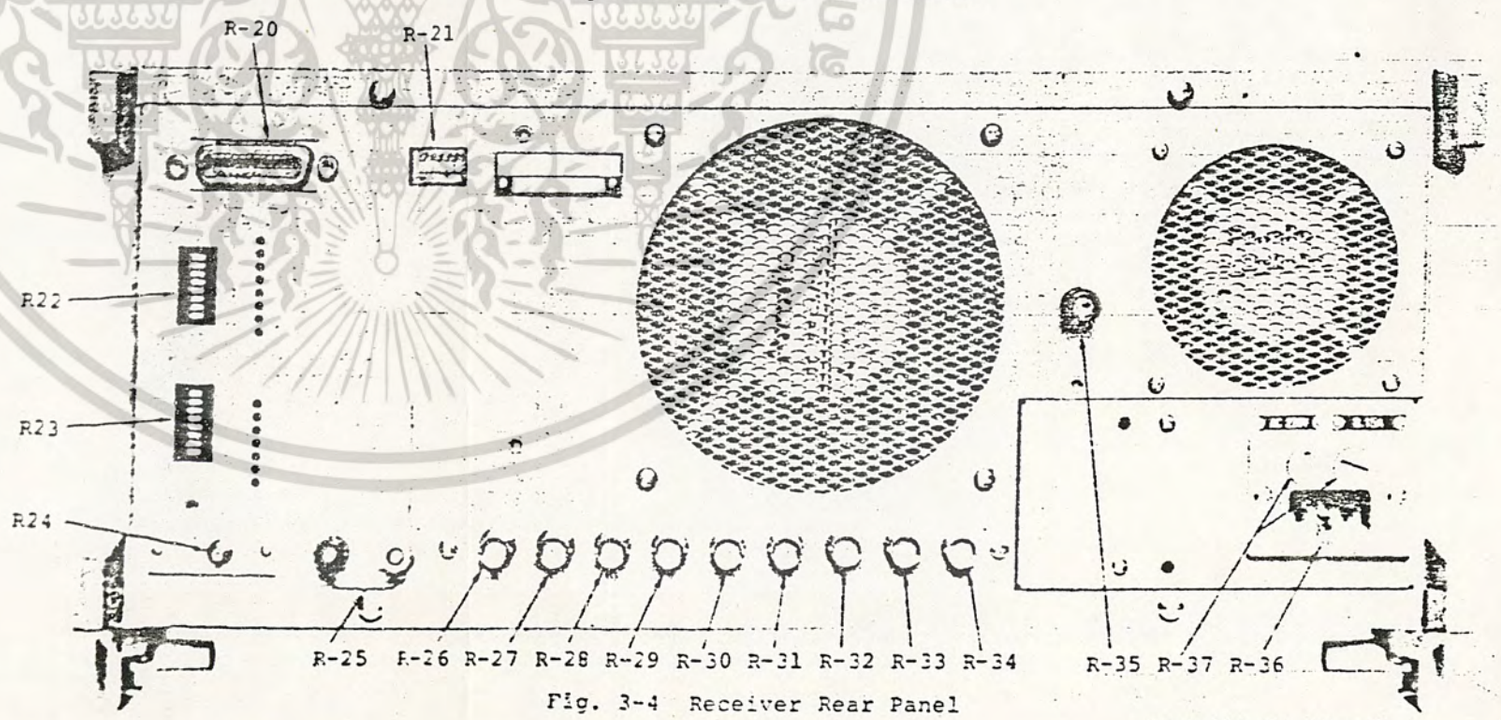


Fig. 3-4 Receiver Rear Panel

1.4 Measuring procedure

(1) Set the measuring instruments as shown in table below.

Measuring instrument	Key/ dial	Set point
ME520B (T)	BIT RATE	2048 Kb/s
	FORMAT	HDB3
	PATTERN - PRBS	$2^{15}-1$ (See page 69)
	- ZERO SUBSTITUTION	OFF (Press "OFF" key)
	ERROR ADDITION - MODE	BIT
	- RATE	OFF
	OUTPUT - HDB3 LEVEL	2.37 V
	FREQ OFFSET/JITTER MOD-MODE	OFF
ME520B (R)	BIT RATE/FORMAT - RECOVERY	2048 Kb/s
	FORMAT	HDB3
	PATTERN - PRBS	$2^{15}-1$
	- ZERO SUBSTITUTION	OFF (Press "OFF" key)
	INPUT - HDB3 MODE	TERM
	GATING PERIOD/REAL TIME-MODE	TIME
	-SETVORA	00 (Hour) 01 (Min) 00 (Sec) (1 minute)
	MEAS/ EVALUATION	SINGLE
		CURRENT DATA
	ERROR - MODE	BIT
	- SYNC	AUTO
	- ERRO THRESHOLD SET	OFF (LED does not ligh
	- SHIFT	OFF (LED does not ligh
	- DISPLAY MODE	COUNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	PRINTER - PRINT	ON (LED lights); when printer output is neede OFF (LED does not light ; when printer output i not needed.
	PRINTER OUTPUT SELECTION (real panel) A and B C∼H	 1 (ON) 0 (OFF)
	ADDITIONAL FUNCTION (rear panel) A and B C∼H	 0 (OFF) 1 (ON)
MN932A attenuator	ATT(dB)	13 dB
ML93A	dBm CAL FACTOR ZERO SET FINE Shut off any light using the cover attached to the sensor and press the "ZERO SET FINE" key. Then the apparatus starts zero adjustment. Note that zero adjustment operation requires about three seconds.	ON (LED lights) 0.00 dB (Display indication)

(2) Connect the G terminals on the measuring instruments to those on the 8M MUX (DEMUX).

(3) Turn the "LDSOINH" and "MAINT" switches (red coloured switches) of the 8MOLTE at the station A to the upper side. The location of the switches is shown in Fig. 1.3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อ.กอบชัย เดชหาญ และ อ.ถวิล กิ่งทอง ผู้ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ในหลักการปฏิบัติงานค้นคว้า และให้แนวทางการทำปริญญานิพนธ์จนบันลุผลสำเร็จ อีกทั้งช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ เครื่องมือในการทดลอง แนวทางปฏิบัติทดลอง ให้ข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็น และขอขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่นทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้ยืมอุปกรณ์การทดลองบางอย่างที่ขาดเหลือจนทุกอย่างสำเร็จลงด้วยดี ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารอ้างอิง

1. T. Gaskell, "Digital noise source",
   Practical Electronic, December 1984, pp.46-49.
2. A. Flind, "Pseudo-random noise generator",
   Everyday Electronic, April 1990, pp.248-250.

หนังสืออ้างอิง

1. J. Markus, "Electrical circuits manual",
   Editional Board America Society of Information service.

2. F. E. Owen, "PCM and Digital Transmission Systems",
   McGraw-Hill Book Company, New York, pp.1-16, pp.34-59,
   pp.76-106, 1982.

3. S. Haykin, "Communication System", Wiley Eastern
   Limited, New Delhi, pp.430-501, 1982.

4. B. P. Lathi, "Communication System", Wiley Eastern
   Limited, New Delhi, pp.241-331, pp.393-421, 1977.

5. K. S. Shanmugam, "Digital and Analog Communication
   System", John Wiley & Sons, New York, pp.68-117,
   pp.443-493, 1979.

6. C. W. Helstrom, "Statistical theory of signal
   detection", Pergamon International Library, New York,
   pp.30-73, pp.183-208, 1968.

7. C. A. Verger, "Handbook of electrical noise : Mesurement
   and technology", Tab Books, Pennsynvania, 1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้