ปีการศึกษา ๒๕๓๓

เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดข้อมูล
(BIT ERROR RATE MONITOR)

โดย

นาย รัฐวุฒิ ประทุมราช

นาย วรเทพ มงคลประพฤติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา ๒๕๓๓.

ภาควิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดอัตราความผิดพลาดข้อมูล

ผู้จัดทำ

1.นาย รัฐวุฒิ ประทุมราช

2.นาย วรเทพ มงคลประพฤติ

ผศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....)

027942

เลขหมู่ T 33109 ร3

เลขทะเบียน 027942

วัน, เดือน, ปี 18 ก.ค. 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIT ERROR RATE MONITOR

Rattawoot Pratoomraj

Vorathep Mongkolprapruet

Assistant Professor Dr.Kobchai Dejhan

1990

Abstract.

This thesis presents the application of Pseudo Random Binary Sequences (PRBS) to construct the bit error rate monitor.This equipment is used to measure the quality of digital communication system. The principle is the transmitter will generate the PRBS and then sends it through the communication channel. At the receiver, it will generate the PRBS that have the same pattern as the transmitter. At the receiver, both informations will be compared with the other. The difference is the bit error. However this project is not designed for using in practical communication system because of it has no interfacing equipment and incompletion of our studying about data communication standards but this thesis also presents the way to meet this solution.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	1
1. ทฤษฎีลำดับสุ่มเทียมและการประยุกต์เป็นเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิท	2
1.1 ลำดับสุ่มเทียม	2
1.1.1 คุณสมบัติของการสุ่ม	2
1.1.2 การสร้าง PRBS ด้วยรีจิสเตอร์	4
1.1.3 ลักษณะของ PRBS ที่สร้าง	6
1.1.4 คุณสมบัติของ PRBS	10
1.1.5 การแทน PRBS ด้วยโพลิโนเมียล	12
1.1.6 ตารางของโพลิโนเมียลที่ใช้สร้าง PRBS	12
1.2 เครื่องวัดความผิดพลาด	16
1.2.1 ลักษณะสำคัญของเครื่องวัดความผิดพลาด	17
1.2.2 ชนิดของเครื่องวัดความผิดพลาด	17
1.2.3 คำมาตรฐานที่ใช้ในการวัดคุณภาพระบบการสื่อสาร	17
1.2.4 ลักษณะโดยทั่วไปของความผิดพลาด	18
1.2.5 อัตราความผิดพลาดข้อมูล	18
1.2.6 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดและอัตราความผิดพลาดบิท	19
1.2.7 เครื่องวัดความผิดพลาดโดยวิธีทดสอบต่อเนื่อง	20
2. โครงงานสร้างเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดข้อมูล	22
2.1 หลักการทำงาน	22
2.2 การออกแบบวงจรภาคต่างๆ	25
2.3 วิธีการทดลอง ตอนที่ 1	30
2.4 ผลการทดลอง ตอนที่ 1	33
2.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง ตอนที่ 1	36
2.6 วิธีการทดลอง ตอนที่ 2	37
2.7 ผลการทดลอง ตอนที่ 2	38
2.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง ตอนที่ 2	38
3. สรุป	39
ภาคผนวก A	A1
ภาคผนวก B	B1
ภาคผนวก C	C1
กิตติกรรมประกาศ และ หนังสืออ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 ทฤษฎีลำดับสุ่มเทียม และ การประยุกต์เป็นเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิท

1.1 ลำดับสุ่มเทียม(PSEUDO RANDOM BINARY SEQUENCES - PRBS)

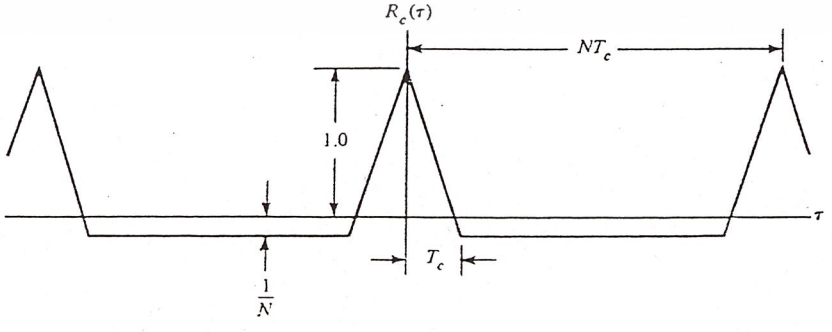
ลำดับสุ่มเทียม หรือ PRBS มีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่น PSEUDO NOISE SEQUENCES-PN หรือ MAXIMAL-LENGTH SHIFT-REGISTER SEQUENCES แต่ในที่นี้จะขอใช้คำว่า PRBS หรือ ลำดับสุ่มเทียม

ลักษณะโดยทั่วไป จะเป็นลำดับตัวเลขฐานสองที่เกิดเป็นรายคาบ โดยสร้างขึ้นจากรีจิสเตอร์ (SHIFT REGISTER) ลำดับดังกล่าวมีความยาว $n = 2^m - 1$ เมื่อ m เป็นจำนวนภาค (Stage) ของรีจิสเตอร์ และมีคุณสมบัติเหมือนข้อมูลที่เกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Random)

1.1.1 คุณสมบัติของการสุ่ม

1. จำนวนของ "1" และ "0" มีค่าเท่ากันโดยประมาณ
2. เมื่อ รัน (Run) คือกลุ่มของข้อมูลที่เหมือนกันและอยู่ติดกัน คุณสมบัติการสุ่มเกี่ยวกับรัน คือ
   - 1/2 ของจำนวนรันทั้งหมด คือรันที่มีความยาวเป็น 1 (ข้อมูลในรันมี 1 ตัว)
   - 1/4 ของจำนวนรันทั้งหมด คือรันที่มีความยาวเป็น 2
   - 1/8 ของจำนวนรันทั้งหมด คือรันที่มีความยาวเป็น 3
   - : : : :
   - $1/2^n$ ของจำนวนรันทั้งหมด คือรันที่มีความยาวเป็น n

   จำนวนรันของ "0" และ "1" มีค่าเท่ากัน
3. ค่าฟังค์ชั่นออโตคอร์รีเลชั่นของข้อมูลสุ่ม มีลักษณะเป็นยอดตรงกลางและลดลงอย่างรวดเร็ว ตรงปลาย ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ค่าฟังค์ชั่นออโตคอร์รีเลชั่นของข้อมูลสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่า PRBS มีลักษณะและคุณสมบัติ เป็นข้อมูลแบบสุ่ม (มีคุณสมบัติการสุ่มครบ 3 ข้อ เราจะยกตัวอย่าง PRBS ซึ่งมีคาบ = 15

000 100 110 101 111

1. จำนวน "1" มีทั้งหมด 8 ตัว

จำนวน "0" มีทั้งหมด 7 ตัว

∴ เป็นไปตามคุณสมบัติข้อ 1

2. | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | มีจำนวนรันทั้งหมด 8 รัน

จำนวนรันที่มีความยาว 1 มีทั้งหมด 4 รัน = 1/2 x 8

จำนวนรันที่มีความยาว 2 มีทั้งหมด 2 รัน = 1/4 x 8

จำนวนรันที่มีความยาว 3 มีทั้งหมด 1 รัน = 1/8 x 8

จำนวนรันที่มีความยาว 4 มีทั้งหมด 1 รัน ~ 1/16 x 8 = 0.5

∴ ใกล้เคียงตามคุณสมบัติข้อ 2

3. เมื่อ PRBS 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 (τ = 0)

PRBS ที่เลื่อนไป 1 ขั้น 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 (τ = 1)

กำหนดให้ A คือ จำนวนข้อมูลที่เหมือนกันของลำดับทั้งสอง

D คือ จำนวนข้อมูลที่ต่างกันของลำดับทั้งสอง

จากสูตรการหา ออโตคอร์รีเลชั่น [C (τ)]

$$C(\tau) = \frac{A - D}{A + D} \qquad [1]$$

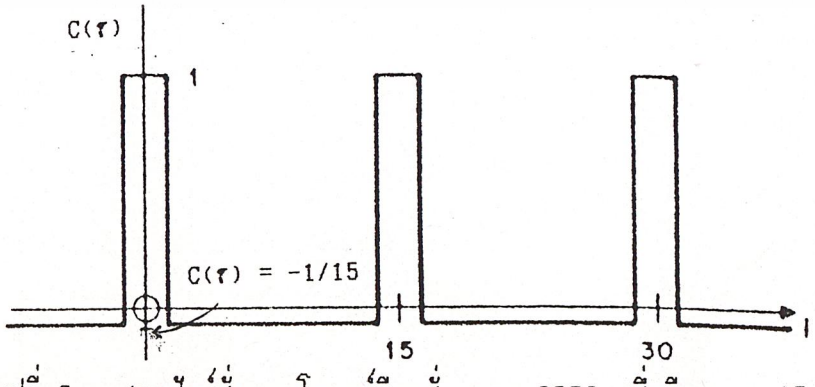
เราสามารถคำนวณหาออโตคอร์รีเลชั่นของลำดับตัวอย่างได้

C (0) = 1

C (1) = -1/15

: :

C (τ) = -1/15 เมื่อ 0 < τ < 14



รูปที่ 2 แสดงฟังค์ชั่น ออโตคอร์รีเลชั่น ของ PRBS ซึ่งมีคาบ = 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 การสร้าง PRBS ด้วย รีจิสเตอร์

ก่อนจะกล่าวถึงการสร้าง PRBS จำเป็นต้องให้นิยามของไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล (Primitive Polynomial) เสียก่อน

นิยาม ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล ; h (x) คือ โพลิโนเมียล กำลัง m ซึ่งไม่สามารถแยกตัวประกอบได้อีก นอกจาก 1 กับตัวมันเอง รวมทั้งสามารถหารด้วย $x^k + 1$ เมื่อ $k = 2^n - 1$ ได้ แต่ไม่สามารถหารด้วย $x^k + 1$ เมื่อ $k<2^n-1$ ได้ ทุก ๆ ค่าของ m จะมีไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล กำลัง m อยู่อย่างน้อย 1 โพลิโนเมียล ตัวอย่าง ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล ที่มีกำลัง 1-40 แสดงดังรูปที่ 3

deg m	$h(x)$	deg m	$h(x)$
1	$x+1$	21	$x^{21}+x^2+1$
2	x^2+x+1	22	$x^{22}+x+1$
3	x^3+x+1	23	$x^{23}+x^5+1$
4	x^4+x+1	24	$x^{24}+x^4+x^3+x+1$
5	x^5+x^2+1	25	$x^{25}+x^3+1$
6	x^6+x+1	26	$x^{26}+x^8+x^7+x+1$
7	x^7+x+1	27	$x^{27}+x^8+x^7+x+1$
8	$x^8+x^6+x^5+x+1$	28	$x^{28}+x^3+1$
9	x^9+x^4+1	29	$x^{29}+x^2+1$
10	$x^{10}+x^3+1$	30	$x^{30}+x^{16}+x^{15}+x+1$
11	$x^{11}+x^2+1$	31	$x^{31}+x^3+1$
12	$x^{12}+x^7+x^4+x^3+1$	32	$x^{32}+x^{28}+x^{27}+x+1$
13	$x^{13}+x^4+x^3+x+1$	33	$x^{33}+x^{13}+1$
14	$x^{14}+x^{12}+x^{11}+x+1$	34	$x^{34}+x^{15}+x^{14}+x+1$
15	$x^{15}+x+1$	35	$x^{35}+x^2+1$
16	$x^{16}+x^5+x^3+x^2+1$	36	$x^{36}+x^{11}+1$
17	$x^{17}+x^3+1$	37	$x^{37}+x^{12}+x^{10}+x^2+1$
18	$x^{18}+x^7+1$	38	$x^{38}+x^6+x^5+x+1$
19	$x^{19}+x^6+x^5+x+1$	39	$x^{39}+x^4+1$
20	$x^{20}+x^3+1$	40	$x^{40}+x^{21}+x^{19}+x^2+1$

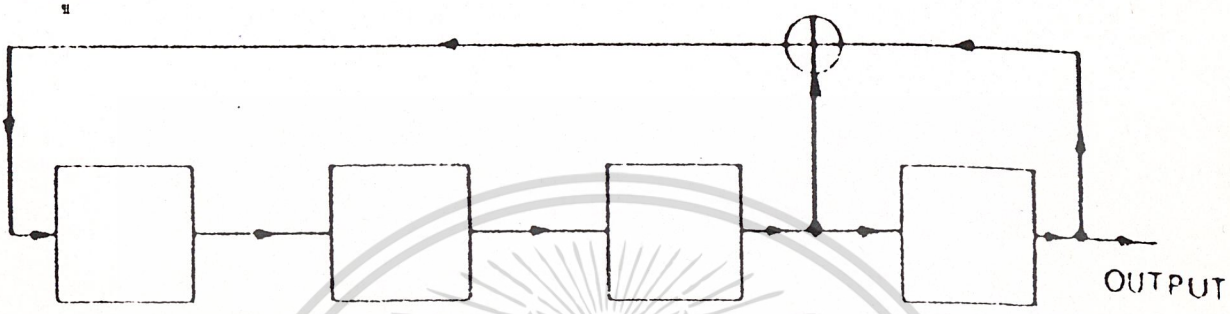
รูปที่ 3 ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล ที่มีกำลังตั้งแต่ 1 ถึง 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้าง PRBS ให้มีความยาว $n = 2^m - 1$ จำเป็นต้องใช้ ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล $h(x)$ ที่มีกำลัง m เช่น

$$h(x) = x^4 + x + 1 \qquad [2]$$

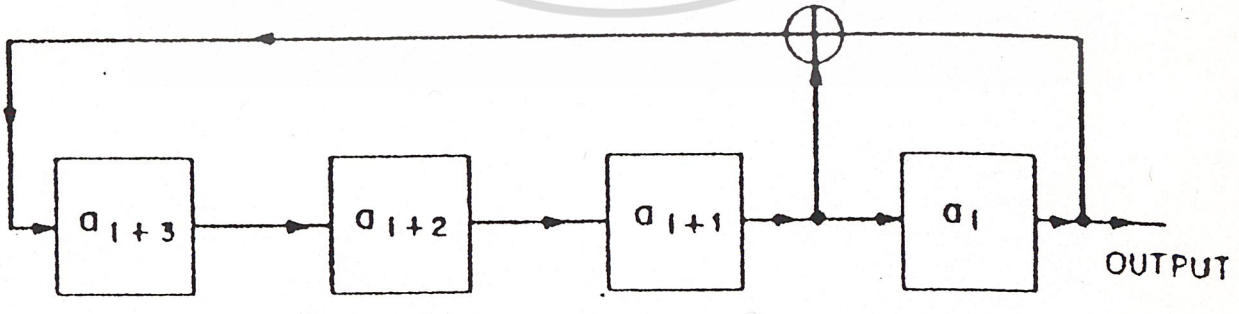
ตัวอย่างดังกล่าวมีกำลัง $m = 4$ โพลิโนเมียลนี้ เป็นตัวกำหนดการป้อนกลับของรีจิสเตอร์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การต่อรีจิสเตอร์ที่มีรูปแบบการป้อนกลับตามสมการ $X^4 + X + 1$

ในรีจิสเตอร์จะประกอบด้วยภาคทั้งหมด m ภาค (แต่ละภาคของรีจิสเตอร์อาจเป็นฟลิปฟลอป) แต่ละภาคของรีจิสเตอร์บรรจุข้อมูล 0 หรือ 1 เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาแต่ละภาคของรีจิสเตอร์ข้อมูลจะถูกเลื่อนไปทางขวาทีละครั้ง ข้อมูลที่บรรจุในภาคที่มีการป้อนกลับ (ตามที่กำหนดโดยโพลิโนเมียล) จะถูกบวกเข้าด้วยกัน แล้ววนกลับมาป้อนทางภาคซ้ายสุด การบวกโดยใช้สัญลักษณ์ $\oplus$ หมายถึงการบวกแบบโมดูโล-2 หรือมอด 2 หรืออาจแทนในรูปวงจรตรรกด้วย เอ็กซ์คลูซีฟ ออร์เกท [นิยามการบวกเอ็กซ์คลูซีฟ ออร์เกท คือ $0 + 0 = 1 + 1 = 0$ และ $0 + 1 = 1 + 0 = 1$]

จากตัวอย่างข้างต้น ถ้าที่เวลา i รีจิสเตอร์มีข้อมูล $a_{i+3}, a_{i+2}, a_{i+1}, a_i$ ที่เวลา $i + 1$ ข้อมูลจะเป็น $a_{i+4} = a_{i+1} + a_i, a_{i+3}, a_{i+2}, a_{i+1}$ ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รีจิสเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ของ การกลับมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า รีจิสเตอร์จะสร้างลำดับที่มีความยาวอนันต์ $a_0, a_1, a_2, \ldots\ldots a_i \ldots\ldots$ เป็นตามสมการ

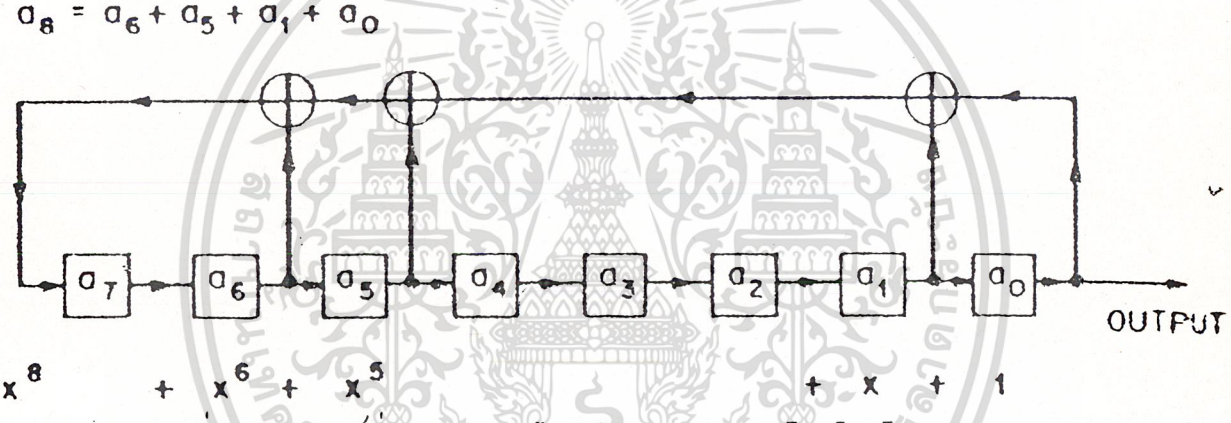
$$a_{i+4} = a_{i+1} + a_i \quad ; i = 0, 1, \ldots\ldots \qquad [3]$$

โดยที่เครื่องหมาย $\oplus$ หมายถึง การบวกแบบมอด-2 เราจำเป็นต้องกำหนดสถานะเริ่มต้น $a_0, a_1, \ldots\ldots a_{m-1}$ ให้กับรีจิสเตอร์ เพื่อให้มันทำงานได้

ตัวอย่างที่ซับซ้อนขึ้นคือเมื่อ m = 8

$$h(x) = x^8+x^6+x^5+x+1 \qquad [4]$$

รีจิสเตอร์ตามรูปที่ 6 เป็นไปตามโพลิโนเมียลดังกล่าว



รูปที่ 6 รีจิสเตอร์ที่มีรูปแบบการป้อนกลับตามสมการ $X^8+X^6+X^5+X+1$

ลำดับเอาท์พุทจะเป็นไปตามสมการ การกลับมาดังนี้

$$a_{i+8} = a_{i+6} + a_{i+5} + a_{i+1} \qquad i = 0,1,\ldots\ldots, \qquad [5]$$

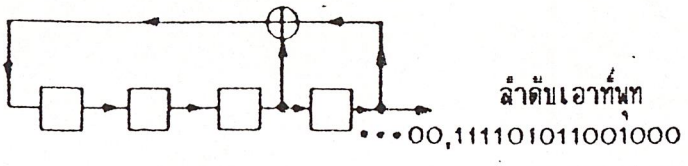
เมื่อค่าเริ่มต้นเป็น $a_0, a_1, \ldots\ldots a_7$

1.1.3 <u>ลักษณะของ PRBS ที่สร้าง</u>

ในแต่ละภาคของรีจิสเตอร์ ที่มีจำนวนเท่ากับ m ภาค ล้วนแต่บรรจุข้อมูล 0 หรือ 1 ดังนั้นจึงมีสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 2^m สถานะ จะเห็นว่า ลำดับ $a_0\ a_1\ a_2\ \ldots\ldots$ มีลักษณะเป็นคาบ สำหรับกรณีที่ข้อมูลในแต่ละภาค เป็น 0 ทั้งหมด เป็นกรณีต้องห้าม และยอมให้เกิดขึ้นไม่ได้ เพราะจะทำให้ลำดับที่เกิดเป็น 0 ทั้งหมดไม่เป็น PRBS ดังนั้นเราจึงต้องหลีกเลี่ยงกรณีนี้ แล้วเราจะได้ PRBS ซึ่งมีคาบยาว 2^m-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 7 แสดงสถานะต่าง ๆ และลำดับเอาท์พุทของวงจร ในรูปที่ 4 เมื่อกำหนดสถานะเริ่มต้นเป็น 1000 จะสังเกตได้ว่า ลำดับที่ได้ทางเอาท์พุทเหมือนกับคอลัมน์ขวาสุด ในตาราง



สถานะที่	สถานะ			
0	1	0	0	0
1	0	1	0	0
2	0	0	1	0
3	1	0	0	1
4	1	1	0	0
5	0	1	1	0
6	1	0	1	1
7	0	1	0	1
8	1	0	1	0
9	1	1	0	1
10	1	1	1	0
11	1	1	1	1
12	0	1	1	1
13	0	0	1	1
14	0	0	0	1
15 = 0	1	0	0	0
16 = 1	0	1	0	0
	(ซ้ำ)			

รูปที่ 7 สถานะภายในและลำดับเอาท์พุทที่ได้จากรีจิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1
0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0
0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0
1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0
0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1
0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0
1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0
1 0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1
0 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1
1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0
0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1
1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0
1 1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1
1 1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1
1 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1

รูปที่ 8 ลำดับสุ่มเทียม 15 ลำดับ ที่ได้จากวงจรในรูปที่ 7

ลำดับในตัวอย่างนี้มีคาบยาว $= 2^4 - 1 = 15$ ส่วนเอาท์พุทของรีจิสเตอร์ในรูปที่ 6 มีคาบ $= 2^8-1 = 255$

เราสามารถสรุปได้ว่า ถ้า h(x) เป็นไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล ที่มีกำลัง m แล้ว รีจิสเตอร์จะผ่านสถานะที่ข้อมูลไม่เป็น 0 ทั้งหมด จำนวน $2^m - 1$ สถานะ ก่อนจะซ้ำเป็นคาบ และสร้างลำดับเอาท์พุท

$$a_0\ a_1\ a_2 \ldots\ldots\ldots \qquad [6]$$

ซึ่งมีคาบยาว $2^m - 1$ เราสามารถเขียนลำดับดังกล่าวเป็นรูปทั่วไปได้ว่า

$$a_i\ a_{i+1} \ldots\ldots\ldots a_{i+2^m-2} \qquad [7]$$

ถ้าลำดับตามสมการ [7] มีความยาว $2^m - 1$ แล้วลำดับนั้นคือ **ลำดับสุ่มเทียมหรือ PRBS**

ลองพิจารณารูปที่ 7 อีกครั้ง ถ้าหากมีการเปลี่ยนสถานะเริ่มต้นใหม่ (ไม่ใช่ 1000) สถานะดังกล่าวก็ยังคงเป็นสถานะใดสถานะหนึ่งในตาราง และเอาท์พุท PRBS ที่ได้ใหม่ก็เป็นเพียงลำดับ $a_0\ a_1\ a_2 \ldots\ldots\ldots$ ที่เลื่อนไปเท่านั้น

สรุปได้ว่า ทุก ๆ สถานะเริ่มต้นที่ไม่เป็น 0 ทั้งหมด จะให้เอาท์พุทเป็นเซต ซึ่งประกอบด้วยสมาชิกซึ่งเป็นลำดับสุ่มเทียมเหมือนกัน (เพียงแต่ลำดับที่ไม่ตรงกันเท่านั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LENGTH = 3

011

LENGTH = 7

0010111

LENGTH = 15

0001001101011111

LENGTH = 31

00001001011001111100011011101O1

LENGTH = 63

000001000011000101001111010001111001C010110111011001
11010101111111

LENGTH = 127

0000001000000110000101000111100100010110011101010011
1111010CC0111000100100C11011010110111101100011010010
0111011100110010101011111111

LENGTH = 255

0000000101110001110111100010110011011000011110011100
00001C10111111110010111101001C10300110111011111
0101111010000011001010101000110101100011000001001011
1011010101C0110100111111011100110011110110010000100
0001110010010011000100111010101101000100010100100011111

รูปที่ 9 ตัวอย่างของลำดับสุ่มเทียม ที่มีคาบยาวต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
027942

1.1.4 คุณสมบัติของ PRBS

ความจริงคุณสมบัติเชิงคณิตศาสตร์ของ PRBS มีมากมาย บางเรื่องก็ยากแก่การทำความเข้าใจ ซึ่งทำให้ยังไม่สามารถนำความรู้นั้นมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายได้ ในที่นี้จึงขอเสนอคุณสมบัติที่น่าสนใจ ง่ายต่อการทำความเข้าใจและการนำไปประยุกต์ใช้ (สำหรับผู้สนใจสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [11])

ก่อนอื่นขอกำหนดความหมายของสัญญลักษณ์ต่าง ๆ ดังนี้คือ $h(x)$ เป็นไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล ซึ่งมีกำลัง m และให้ δ_m เป็นเซท ซึ่งประกอบด้วย PRBS ทุกลำดับที่เกิดจาก $h(x)$ รวมทั้งลำดับที่เป็น 0 ทั้งหมดด้วย ตัวอย่างเช่น δ_4 มีจำนวนสมาชิกที่เป็นลำดับทั้งหมด 16 ลำดับ (รวมลำดับที่เป็น 0 ทั้งหมดด้วย)

1. คุณสมบัติการเลื่อน : ถ้า $b = b_0\ b_1 \ldots\ldots b_{2^m-2}$ เป็น PRBS ใด ๆ ใน δ_m แล้วการเลื่อนแบบวน ของข้อมูลใน b ก็จะทำให้ลำดับที่ได้ใหม่ยังคงอยู่ใน δ_m ด้วย

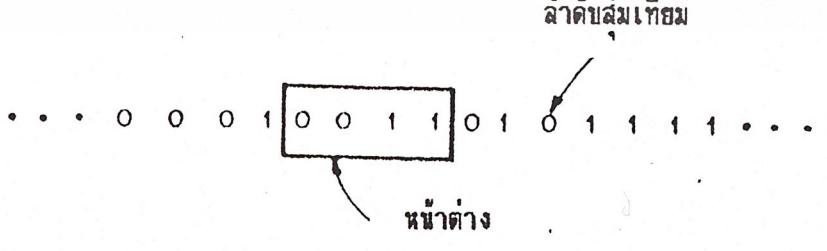
2. คุณสมบัติการกลับมา (The Recurrence): สมมติให้ $h(x) = \sum_{i=0}^{m} h_i x^i$ โดยที่ $h_0 = h_m = 1$ และ $h_i = 0$ หรือ 1 สำหรับ $0<i<m$

   PRBS ซึ่งเขียนแทนด้วย b และ $b \in \delta_m$ จะเป็นไปตามคุณสมบัติการกลับมาดังนี้

   $$b_{i+m} = h_{m-1}\ b_{i+m-1} + h_{m-2}\ b_{i+m-2} + \ldots\ldots + h_1\ b_{i+1} + b_i \quad [8]$$

   สำหรับ $i = 0, 1, \ldots\ldots$ (สมการ [8] คือรูปทั่วไปของสมการ [3] กับ [5])

3. คุณสมบัติหน้าต่าง (The Window Property): ถ้าหน้าต่างของข้อมูลซึ่งมีความยาว m ถูกเลื่อนไปตาม PRBS ใน δ_m แล้ว หน้าต่างซึ่งบรรจุข้อมูลจำนวน m ตัว ที่ไม่เป็น 0 และมีทั้งหมดจำนวน 2^m-1 หน้าต่างจะถูกเห็นเพียงครั้งเดียว สำหรับ PRBS นั้น ๆ (ดูตัวอย่างตามรูปที่ 10)



รูปที่ 10 คุณสมบัติหน้าต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. บิท 0 ครึ่งและบิท 1 ครึ่ง: ลำดับสุ่มเทียมหรือ PRBS ใด ๆ ใน δ_m จะมีจำนวนของบิท 1 เท่ากับ 2^{m-1} และจำนวนของบิท 0 เท่ากับ $2^{m-1}-1$ เสมอ

5. คุณสมบัติการบวก (The Addition Property): ผลบวกของลำดับ 2 ลำดับใด ๆ ใน δ_m (ต้องเป็นการบวกแบบโมดูโล-2 และไม่มีตัวทด) จะเป็นอีกลำดับหนึ่ง ซึ่งอยู่ใน δ_m เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 8 ผลบวกของลำดับที่หนึ่งและสองคือลำดับที่ห้า

6. คุณสมบัติการเลื่อนและบวก (The Shift and Add Property): ผลบวกของ PRBS กับตัวมันเองที่ถูกเลื่อนแบบวน กลายเป็นลำดับใหม่ จะเป็น PRBS อีกลำดับหนึ่ง (จากคุณสมบัติ ข้อ 1 และข้อ 5)

ก่อนจะกล่าวถึงคุณสมบัติข้อที่ 7 คือ ฟังค์ชั่นออโตคอร์รีเลชั่นของ PRBS จะขอกล่าวถึงสูตรในการคำนวณหาค่าฟังค์ชั่นออโตคอร์รีเลชั่น ระหว่างลำดับ PRBSเดิม และ PRBSใหม่ อันเกิดจากการเลื่อนวนไปของ PRBS เดิม

เมื่อ A คือจำนวนของข้อมูลที่เหมือนกันระหว่างลำดับทั้งสอง และ D คือจำนวนของข้อมูลที่ต่างกันจะได้ว่า

$$\rho(i) = \frac{A - D}{A + D} = \frac{A - D}{n}$$

ยกตัวอย่าง PRBS ในรูปที่ 8 จะเห็นว่ามีค่าฟังค์ชั่นออโตคอร์รีเลชั่น $\rho(0) = 1$ และ $\rho(i) = -1/15$ สำหรับ $1<i<14$

7. ฟังค์ชั่นออโตคอร์รีเลชั่น (Autocorrelation Function): ฟังค์ชั่นออโตคอร์รีเลชั่นของ PRBS ซึ่งมีความยาว $n = 2^m - 1$ เป็นดังนี้

$$\rho(0) = 1$$

$$\rho(i) = \frac{-1}{n} \quad \text{สำหรับ } 1 < i < 2^m - 2, \text{ m คือจำนวนภาคของรีจิสเตอร์}$$

8. รัน (Runs): สำหรับ PRBS ใด ๆ 1/2 ของจำนวนรันทั้งหมดมีความยาว 1, 1/4 และเป็นดังนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึง $1/2^n$ ของรันจะเป็นรันที่มีความยาว n ในทุกกรณีจำนวนรันของบิท 1 และบิท 0 จะมีค่าเท่ากัน จะสังเกตเห็นว่าคุณสมบัติข้อนี้เหมือนกับคุณสมบัติข้อ 3 ของการสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.5 การแทน PRBS ด้วยโพลิโนเมียล

PRBS ใน δ_m สามารถเขียนแทนด้วยโพลิโนเมียลได้ เราอาจแทนลำดับจำนวนฐานสองใด ๆ $a = a_0\ a_1 \ldots\ldots a_{n-1}$ ซึ่งมีความยาว n ด้วยโพลิโนเมียล

$$a(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \ldots\ldots a_{n-1}x^{n-1} \quad [10]$$

ยกตัวอย่าง 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 1 สามารถแทนด้วย

$$a(x) = x^3+x^6+x^7+x^9+x^{11}+x^{12}+x^{13}+x^{14} \quad [11]$$

การเลื่อนแบบวนไปทางขวา 1 ครั้ง ของลำดับ a จะได้ $a_{n-1}, a_0, a_1 \ldots a_{n-2}$ สามารถเขียนเป็นโพลิโนเมียลได้ $a_{n-1} + a_0x + \ldots\ldots + a_{n-2}x^{n-1}$ ถ้าเราให้ $x^n = 1$ แล้วนำ x ไปคูณกับ a(x) จะได้

$$xa(x) = a_0x + a_1x^2 + \ldots + a_{n-2}x^{n-1} + a_{n-1}x^n$$

$$= a_{n-1} + a_0x + \ldots + a_{n-2}x^{n-1}$$

จะเห็นว่าการคูณลำดับด้วย x เหมือนกับการเลื่อนลำดับแบบวน ไปทางขวา 1 ครั้ง

1.1.6 ตารางของโพลิโนเมียลที่ใช้สร้าง PRBS

จากการที่เรารู้ว่าการสร้าง PRBS จำเป็นต้องใช้ไพรมิทีฟโพลิโนเมียลในการสร้าง แต่วิธีการหาไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อน (เอกสารอ้างอิง [6]) เราเลือกใช้โพลิโนเมียล จากตารางที่มีผู้คำนวณมาให้แล้ว โดยวิธีการในการใช้ตารางดังกล่าว เราจะพูดในที่นี้

ตัวเลขทางซ้ายมือสุดของแต่ละแถวคือ กำลัง (ในตารางคือสัญลักษณ์ r) ส่วนตัวเลขในวงเล็บเป็นจำนวนฐานแปด ที่ใช้แทนสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียล เริ่มด้วย x^0 ทางขวามือสุด จนถึง x^r ซึ่งเป็นตำแหน่งซ้ายมือสุดที่มีค่าเป็น 1 วิธีก็คือ เราเปลี่ยนเลขฐานแปดเป็นเลขฐานสอง ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง

ถ้าเราต้องการไพรมิทีฟ โพลิโนเมียลที่มีกำลัง 7 และเราเลือกค่าจากตารางได้ [203] ทำการเปลี่ยนจำนวนฐานแปดเป็นจำนวนฐานสองได้ดังนี้

2 0 3	จำนวนฐานแปด
0 1 0 0 0 0 1 1	จำนวนฐานสอง
x^7 x^1 x^0	พจน์ที่มีสัมประสิทธิ์เป็น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราจะได้โพลิโนเมียล ดังนี้

$$h(x) = x^7 + x + 1 \qquad [12]$$

ถ้าสังเกตดูจะพบว่าค่า [203] ที่เราเลือกมาจากตาราง จะมีเครื่องหมายดอกจันที่มุมขวาบน ซึ่งค่าจำนวนฐานแปด ที่ใช้แทนโพลิโนเมียลทุกค่าในตารางที่มีเครื่องหมายดอกจันนั้น หมายถึง โพลิโนเมียลที่ได้จากค่าดังกล่าว จะมีเพียง 3 พจน์ นั่นคือ เมื่อนำมาต่อเป็นวงจรจะมีการป้อนกลับเพียง 2 จุดเท่านั้น ซึ่งการป้อนกลับจำนวนน้อย ๆ เช่นนี้ มีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้สำหรับวงจรที่ต้องการความเร็วสูง

สำหรับค่าของโพลิโนเมียลในตารางจะไม่มีค่าของรีซิโพรคัล โพลิโนเมียล ของโพลิโนเมียลนั้นมาให้เพราะว่า รีซิโพรคัล โพลิโนเมียล ของ ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล ก็มีคุณสมบัติเป็น ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล ด้วยเช่นกัน

<u>หมายเหตุ</u> สูตรในการหา รีซิโพรคัล โพลิโนเมียล คือ

$$h^*(x) = \sum_{k=0}^{m} h_k x^{m-k} = x^m h(1/x) \qquad [13]$$

ตัวอย่างเช่น โพลิโนเมียลกำลัง 4 จากตารางคือ [23] แปลงเป็น โพลิโนเมียลได้ $h(x) = x^4 + x + 1$ ∴ รีซิโพรคัล โพลิโนเมียล คือ $h^*(x) = x^4 h(1/x) = x^4 + x^3 + 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียลที่มีกำลัง $r \leq 34$

กำลัง	ไพรมิทีฟโพลิโนเมียลในรูปจำนวนฐานแปด
2	[7]*
3	[13]*
4	[23]*
5	[45]*,[75],[67]
6	[103]*,[147],[155]
7	[211]*,[217],[235],[367],[277],[325],[203]*,[313],[345]
8	[435],[551],[747],[453],[545],[537],[703],[543]
9	[1021]*,[1131],[1461],[1423],[1055],[1167],[1541], [1333] ,[1605],[1751],[1743],[1617],[1553],[1157]
10	[2011]*,[2415],[3771],[2157],[3515],[2773],[2033], [2443] ,[2461],[3023],[3543],[2745],[2431],[3177]
11	[4005]*,[4445],[4215],[4055],[6015],[7413],[4143], [4563] ,[4053],[5023],[5623],[4577],[6233],[6673]
12	[10123],[15647],[16533],[16047],[11015],[14127], [17673],[13565],[15341],[15053],[15621],[15321], [11417],[13505]
13	[20033],[23261],[24623],[23517],[30741],[21643], [30171],[21277],[27777],[35051],[34723],[34047], [32535],[31425]
14	[42103],[43333],[51761],[40503],[77141],[62677], [44103],[45145],[76303],[64457],[57231],[64167], [60153],[55753]
15	[100003]*,[102043],[110013],[102067],[104307],[100317], [177775] ,[103451],[110075],[102061],[114725],[103251], [100021]*,[100201]*
16	[210013],[234313],[233303],[307107],[307527],[306357], [201735],[272201],[242413],[270155],[302157],[210205], [305667],[236107]
17	[400011]*,[400017],[400431],[525251],[410117],[400731], [411335] ,[444257],[600013],[403555],[525327],[411077], [400041]*,[400101]*
18	[1000201]*,[1000247],[1002241],[1002441],[1100045], [1000407] ,[1003011],[1020121],[1101005],[1000077], [1001361] ,[1001567],[1001727],[1002777]
19	[2000047],[2000641],[2001441],[2000107],[2000077], [2000157],[2000175],[2000257],[2000677],[2000737], [2001557],[2001637],[2005775],[2006677]
20	[4000011]*,[4001051],[4004515],[6000031],[4442235]
21	[10000005]*,[10040205],[10020045],[10040315],[10000635], [10103075] ,[10050335],[10002135],[17000075]
22	[20000003]*,[20001043],[2222223],[25200127],[20401207], [20430607] ,[20070217]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ) ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียลที่มีกำลัง $r \leq 34$

กำลัง	ไพรมิทีฟโพลิโนเมียลในรูปจำนวนฐานแปด
23	[40000041]*,[40404041],[40000063],[40010061],[50000241], [40220151] ,[40006341],[40405463],[40103271],[41224445], [4043561]
24	[100000207],[125245661],[113763063]
25	[200000011]*,[200000017],[204000051],[200010031], [200402017] ,[252001251],[201014171],[204204057], [200005535] ,[200014731]
26	[400000107],[430216473],[402365755],[426225667], [510664323],[473167545],[411335571]
27	[1000000047],[1001007071],[1020024171],[1102210617], [1250025757],[1257242631],[1020560103],[1112225171], [1035530241]
28	[2000000011]*,[2104210431],[2000025051],[2020006031], [2002502115] ,[2001601071]
29	[4000000005]*,[4004004005],[4000010205],[4010000045], [4400000045] ,[4002200115],[4001040115],[4004204435], [4100060435] ,[4040003075],[4004064275]
30	[10,040,000,007],[10,104,264,207],[10,115,131,333],[11,362,212,703], [10,343,244,533]
31	[20,000,000,011]*,[20,000,000,017],[20,000,020,411],[21,042,104,211] [20,010,010,017] ,[20,005,000,251],[20,004,100,071],[20,202,040,217] [20,000,200,435] ,[20,060,140,231],[21,042,107,357]
32	[40,020,000,007],[40,460,216,667],[40,035,532,523],[42,003,247,143], [41,760,427,607]
33	[100,000,020,001]*,[100,020,024,001],[104,000,420,001], [100,020,224,401] ,[111,100,021,111],[100,000,031,463], [104,020,466,001] ,[100,502,430,041],[100,601,431,001]
34	[201,000,000,007],[201,472,024,107],[377,000,007,527], [225,213,433,257],[227,712,240,037],[251,132,516,577], [211,636,220,473],[200,000,140,003]
35	[400,000,000,005]*
36	[1,000,000,004,001]*
37	[2,000,000,012,005]
38	[4,000,000,000,143]
39	[10,000,000,000,021]*
40	[20,000,012,000,005]
61	[200,000,000,000,000,000,047]
89	[400,000,000,000,000,000,000,000,000,151]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 เครื่องวัดความผิดพลาด

อัตราความผิดพลาด (ER) หรือพารามิเตอร์ตัวอื่น เช่น BER, BLER, CER, PER, RER สามารถบ่งบอกคุณภาพของระบบการสื่อสารนั้น ๆ ถ้าข่าวสารที่ถูกส่งและข่าวที่รับได้สามารถถูกนำมาเปรียบเทียบกันได้ ความผิดพลาดของข่าวสารก็จะสามารถตรวจสอบได้ง่าย และการวัดอัตราความผิดพลาดจะกระทำได้อย่างตรงไปตรงมา ในทางปฏิบัติฝ่ายรับข่าวสารไม่สามารถรู้ข่าวสารของฝ่ายส่งล่วงหน้าได้ ดังนั้นจึงอาศัยการประเมินค่า พารามิเตอร์ของข่าวสารที่ได้รับมาคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดแทน เรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ประมาณค่านี้ว่า **"เครื่องวัดความผิดพลาด"** (Error Monitor)

การแก้ปัญหาการประมาณค่าของเครื่องวัดความผิดพลาด ขึ้นกับศิลปะการออกแบบและการประยุกต์ใช้งาน เครื่องวัดความผิดพลาดที่ง่ายที่สุด ก็จะแสดงได้แค่ว่าระบบการสื่อสารนั้นเลวหรือดีเท่านั้น (ยอมรับได้หรือยอมรับไม่ได้) หรือบ่งว่าอุปกรณ์นั้นเสื่อมลงและควรจะได้รับการซ่อมแซม

การแบ่งคุณภาพของระบบการสื่อสารนั้นมีอยู่ 3 ระดับคือ

1. ระดับที่ระบบยังคงทำงานได้ดีอยู่ (มีอัตราความผิดพลาดน้อย)
2. ระดับที่ระบบมีคุณภาพการทำงานที่แย่ลง (มีอัตราความผิดพลาด) แต่ยังสามารถยอมรับได้
3. ระดับที่ระบบมีคุณภาพการทำงานที่แย่มาก มีอัตราความผิดพลาดสูง จนยอมรับไม่ได้

การจัดแบ่งเช่นนี้ก็เพื่อที่จะให้ระบบการสื่อสารทำงานอย่างต่อเนื่อง เช่นระบบใดที่มีระดับคุณภาพถึงระดับที่ 2 ก่อนจะถึงระดับที่ 3 ก็ให้ทำการเปลี่ยน, ซ่อม ระบบนั้นก่อน เพื่อมิให้เกิดความเสียหายแก่ระบบสื่อสาร โดยนำอะไหล่สำรองมาเปลี่ยนแทนและอาจมีการเตือน(Alarm)ก่อนถึงระดับ 3 ก็ได้ ในการทำสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณเชิงเลข โดยขบวนการ สุ่มสัญญาณ(Sampling),คงสัญญาณ(Holding),จัดระดับ(Quantizing),เข้ารหัส(Coding) เรียกสัญญาณที่ได้ว่า เสียงในรูปเชิงเลข แล้วทำการส่งผ่านระบบการสื่อสารนั้น ค่าที่ยอมรับได้ของเสียงในรูปเชิงเลข คือมี BER $< 10^{-3}$ ในขณะที่ สัญญาณข้อมูล ยอมให้มี BER $<10^{-7}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.1 ลักษณะสำคัญของเครื่องวัดความผิดพลาด

1. มีความไวต่อข่าวสารที่ได้รับ
2. มีโครงสร้างง่าย, การเชื่อมต่อเข้าระบบการสื่อสารง่าย
3. ตรวจความผิดพลาดได้เร็ว
4. สามารถประมาณค่าอัตราความผิดพลาดโดยไม่ไปรบกวนข่าวสารที่นำมาใช้ประเมิน
5. มีความแม่นยำ และ สามารถกำหนดระดับการประมาณค่าอัตราความผิดพลาดใหม่ได้เอง

1.2.2 ชนิดของเครื่องวัดความผิดพลาด

1. ใช้ลำดับทดสอบ
2. วัดพารามิเตอร์สัญญาณ
3. ใช้การตรวจจับไวโอเลชั่น
4. ใช้การตรวจจับความผิดพลาดเทียม

แต่ในที่นี้ขอเน้นเฉพาะ ชนิดใช้ลำดับทดสอบเท่านั้น

1.2.3 คำมาตรฐานที่ใช้ในการวัดคุณภาพระบบการสื่อสาร

แบ่งได้ 7 คำคือ

1. ความไว้ใจได้ (Reliability)
2. ความถูกต้องแน่นอน (Accuracy)
3. ความหน่วง (Delay)
4. ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล (Efficiency)
5. ความมั่นคงปลอดภัย (Security)
6. ความยืดหยุ่น (Transparency)
7. การใช้ระบบอย่างคุ้มค่า (Accessibility)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.4 ลักษณะโดยทั่วไปของความผิดพลาด

ถึงแม้จะเป็นที่รู้กันทั่วไปว่า ระบบสื่อสารแบบเชิงเลขนั้น มีความคงทนต่อการเกิดความผิดพลาด (Impairment) ของข้อมูล มากกว่าระบบสื่อสารแบบเชิงอุปมานก็ตาม แต่ความผิดพลาดก็ยังอาจเกิดขึ้นได้ ถ้าการเกิดความผิดพลาดนั้นมีขนาดใหญ่

เพราะว่าการส่งสัญญานทั้ง 2 ระบบ คือ เชิงเลขและเชิงอุปมาน ล้วนแต่ส่งไปในรูปของรูปคลื่นเชิงอุปมาน ดังนั้นลักษณะโดยทั่วไปของการเกิดความผิดพลาดจึงคล้ายกัน ความแตกต่างของการส่งสัญญานทั้งสองแบบคือ ในระบบเชิงเลขจะมีรีพีตเตอร์หรือตัวทวนสัญญาณ แบบรีเจนเนอร์เรทีฟรีฟิตเตอร์ ซึ่งจะถูกติดตั้งเป็นช่วงสั้น ๆ ตลอดระยะทางจากต้นทางถึงปลายทาง ซึ่งเป็นการช่วยลดการเกิดความผิดพลาดที่สะสมตลอดเส้นทาง

ชนิดของการเกิดความผิดพลาดอาจแบ่งใหญ่ ๆ ได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. การเกิดความผิดพลาดแบบเป็นคาบเวลา (Deterministic Impairments) เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของช่องสัญญาณ แต่เราสามารถทำนายการเกิดและผลกระทบของมันได้ จึงสามารถกำจัดได้โดยเสียค่าใช้จ่ายไม่แพง
2. การเกิดความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Impairments) ซึ่งผลของมันที่รบกวนสัญญาณของเรา ไม่อาจทำนายได้ และบ่อยครั้งพบว่าเกิดจากอิทธิพลสิ่งแวดล้อมภายนอก

ตามความเป็นจริงแล้วในระบบสื่อสารเชิงเลขนั้น เกิดความผิดพลาดขึ้น เนื่องมาจากสาเหตุทั้งสองกลุ่มข้างต้นร่วมกัน

แนวคิดในการทำงานของรีเจนเนอเรทีฟ รีพีตเตอร์ คือ จากการที่เรารู้ว่า ถ้ากำลังของสัญญาณที่ส่งมีค่าใกล้เคียงกับกำลังของสัญญาณรบกวน จะทำให้ทางด้านรับตีความสัญญาณของเราผิดไปได้ ดังนั้นอัตราความผิดพลาดจึงสูง แต่ถ้าเรามีการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ก่อนที่ระดับของสัญญาณรบกวนจะถูกสะสมจนมีค่าใหญ่ขึ้น ย่อมสามารถที่จะลดค่าของอัตราความผิดพลาดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่อาจลดสัญญาณรบกวนอันเกิดจากเครื่องรับเองได้

1.2.5 อัตราความผิดพลาดข้อมูล

อัตราความผิดพลาดข้อมูลหาได้จาก การนับจำนวนข้อมูลผิดพลาดที่ได้รับ (N_E) หารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ได้รับ (N_I) ในช่วงเวลาการวัดที่กำหนด

$$ER = \frac{N_E}{N_I} \qquad [13]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไม่รู้โครงสร้างของข้อมูลที่จะวัด ข้อมูลเชิงเลขดังกล่าวจะถูกนับความผิดพลาดเป็นอัตราความผิดพลาดบิท (Bit Error Rate - BER) แต่ถ้าข้อมูลมีโครงสร้างเป็นอักขระ (ตามปกติยาวประมาณ 8 - 10 บิท) หรือบล็อก (ยาวหลายพันบิท) ข้อมูลจะถูกวัดเป็นอัตราความผิดพลาดอักขระ (Character Error Rate - CER) หรืออัตราความผิดพลาดบล็อก (Block Error Rate - BLER) ตามลำดับ

ตามความเป็นจริงแล้วการวัดเป็น CER และ BLER จะมีประโยชน์กว่าการวัด BER เพราะว่าเราสามารถหาสัดส่วนของข้อมูลที่ใช้ได้และข้อมูลที่ใช้ไม่ได้ เช่นสมมติเราส่งข้อมูลไป 3 อักขระ คือ C E และ R โดยที่แต่ละอักขระมีความยาว 8 บิท และความผิดพลาดที่เกิดใน อักขระ C มี 2 บิท, อักขระ R มี 1 บิท ส่วนอักขระ E ไม่มีข้อมูลผิดเลย ดังนั้น CER = 2/3 = 0.67
ส่วน BER = 3/24 = 0.125 จะเห็นว่าจาก CER เราจะรู้ได้ว่าข้อมูลที่ส่งมาใช้ได้ 1 อักขระ แต่ BER เราจะไม่รู้เลยว่าข้อมูลที่ใช้ได้มีกี่อักขระเพราะอาจเป็นไปได้ว่าบิทที่ผิดทั้ง 3 บิท อาจกระจายอยู่ในอักขระทั้ง 3 ซึ่งหมายถึงข้อมูลนี้ส่งมาใช้ไม่ได้เลยซึ่งผิดจากความเป็นจริง

ในบางระบบของการส่งข้อมูลเช่น การส่งแบบอะซิงโครนัส จะมีการเพิ่มบิทที่ใช้ตรวจความผิดพลาดของข้อมูลในอักขระนั้น ที่เรียกว่า พาริตี้บิท การวัดอัตราความผิดพลาดข้อมูลจะวัดเป็นอัตราความผิดพลาดพาริตี้ (Parity Error Rate) ซึ่งหาได้จากจำนวนข้อมูลผิดพลาดที่ถูกตรวจจับโดยพาริตี้บิท หารด้วยจำนวนบิทที่ได้รับทั้งหมด

การวัดอัตราความผิดพลาดข้อมูลไม่ว่าแบบใดก็ตาม สามารถบอกได้เพียงว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าใด ในช่วงเวลาที่กำหนด แต่มิได้บอกว่าความผิดพลาดดังกล่าวมีการแจกแจงกระจายเป็นอย่างไรในช่วงเวลานั้น

1.2.6 <u>ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดและอัตราความผิดพลาดบิท</u>

บางครั้งอาจสับสนระหว่างความน่าจะเป็นของความผิดพลาด P(e) และอัตราความผิดพลาดบิท (BER) เนื่องจากค่าทั้งสองมีความหมายต่างกัน คือ P(e) เป็นการคาดคะเนอัตราความผิดพลาดของระบบที่เราสนใจในเชิงทฤษฎีคณิตศาสตร์ ส่วนอัตราความผิดพลาดบิทคือการนับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริง ๆ (เกิดไปแล้ว) เช่น ในระบบสื่อสารหนึ่ง $P(e) = 10^{-5}$ ความหมายทางคณิตศาสตร์ คือ เราคาดว่าจะเกิดความผิดพลาดขึ้น 1 บิทในทุก ๆ 100,000 บิทที่ส่งมา ($10^{-5} = 1/10^{5}$) ส่วนถ้ากล่าวว่าระบบนี้มี BER = 10^{-5} หมายความว่าจากที่ผ่านมาเราได้วัดระบบนี้แล้วพบว่า มีบิทผิดพลาด 1 บิท สำหรับทุก ๆ 100,000 บิทที่ส่งมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.7 <u>เครื่องวัดความผิดพลาดโดยใช้ลำดับทดสอบ</u> (Test Sequence)

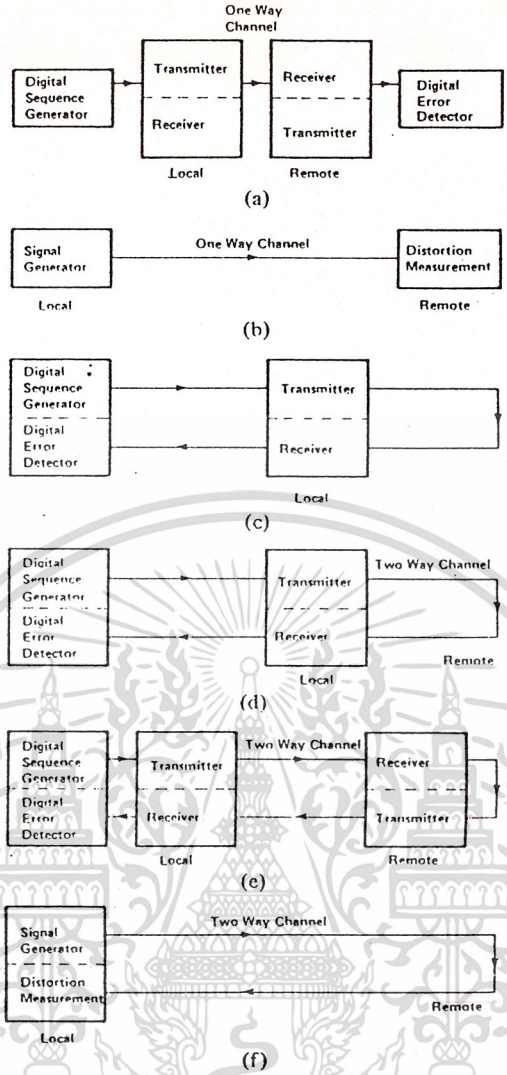
วิธีที่ถูกต้องในการวัดความผิดพลาดของข่าวสารที่ได้รับก็คือ การเปรียบเทียบข่าวสารที่ได้รับกับข่าวสารแท้จริงที่ถูกส่งออกมา ในความเป็นจริงมันเป็นไปไม่ได้ที่ข่าวสารแท้จริงนั้นจะถูกล่วงรู้โดยฝ่ายรับ นอกจากกรณี i) มีการกำหนดรูปแบบเฉพาะของข่าวสารที่ใช้ทดสอบซึ่งฝ่ายส่งและฝ่ายรับรู้กัน เรียกการทดสอบแบบนี้ว่า แบบทางเดียว (One way) ii) ข่าวสารที่ได้รับจะถูกป้อนย้อนกลับไปฝ่ายส่ง เรียกการทดสอบแบบนี้ว่า แบบวนกลับ (Loop back) ซึ่งทั้ง 2 กรณีข่าวสารที่ได้รับจะถูกเปรียบเทียบกับข่าวสารที่ส่งมา เกิดเป็นข่าวสารที่ผิดพลาด (Error Information) และเป็นตัวบอกคุณภาพของระบบการสื่อสารนั้นๆ ในระหว่างการทดสอบข่ายการสื่อสารนั้น ๆ ถ้าไม่สามารถให้บริการส่งผ่านข่าวสารอันอื่นได้อีกเรียกว่า การทดสอบแบบ "นอกบริการ" (Out of Service)

การทดสอบนี้แบ่งตามรูปแบบสัญญาณข่าวสารได้ 2 แบบคือ

1. ลำดับทดสอบเชิงเลข ใช้เฉพาะข่ายสื่อสารเชิงเลข
2. ลำดับทดสอบเชิงอุปมาน ใช้เฉพาะข่ายการสื่อสารเชิงอุปมาน

ในการทดสอบนี้มีความจำเป็นต้องแยกระบบการสื่อสารออกเป็นข่ายการสื่อสารย่อย ๆ ทั้งนี้เพราะความผิดพลาดเกิดเฉพาะข่ายการสื่อสารย่อย ๆ เท่านั้น ซึ่งเป็นขั้นตอนจำเป็นของการซ่อมแซมระบบการสื่อสาร เพราะทำให้เสียเวลาและเสียหายแก่การสื่อสารทั้งระบบ รูปที่ 11 แสดงรูปแบบการทดสอบต่าง ๆ ของลำดับทดสอบทั้งแบบเชิงเลขและเชิงอุปมาน และ แบบ ทางเดียวหรือวนกลับ ในการใช้งานจริงก็ขึ้นอยู่กับแต่ละข่ายการสื่อสารย่อยของระบบ บุคลากร, อุปกรณ์, ความชำนาญ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 วิธีทดสอบระบบสื่อสารโดยใช้ลำดับทดสอบ แบบต่าง ๆ

1. **ลำดับทดสอบเชิงเลข**

การทดสอบแบบนี้ใช้วัดจำนวนบิทข้อมูลที่ผิดพลาดที่ตรวจพบในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ จากที่ผ่านมาเครื่องตรวจจับบิทข้อมูลที่ผิด อาจจะตั้งอยู่คนละแห่งกับเครื่องสร้างบิทข้อมูลที่ใช้ทดสอบ หรือจะตั้งอยู่ที่เดียวกันโดยอาศัยการป้อนกลับของบิทข้อมูลก็ได้

บิทข้อมูลที่ผิดพลาดสามารถนำมาสร้างค่าพารามิเตอร์เพื่อแสดงระดับคุณภาพของช่ายการสื่อสาร ได้ดังนี้คือ - อัตราความผิดพลาดบิท (BER - Bit Error Rate)

- อัตราความผิดพลาดอักระ (CER - Charactor Error Rate)
- อัตราความผิดพลาดบล็อก (BLER - Block Error Rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ลำดับทดสอบเชิงอุปมาน

คือทำการวัดลักษณะสมบัติของสัญญาณเชิงอุปมาน เช่น ขนาด, ความถี่, เฟส ที่ผิดพลาดไปซึ่งถูกตรวจจับได้ทางเครื่องรับ โดยเครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณเชิงอุปมานที่ใช้ทดสอบ (ส่วนมากเป็นคลื่นรูปไซน์ ซึ่งมี 1 ความถี่หรือมากกว่า) ส่งผ่านข่ายการสื่อสารเชิงอุปมานที่จะทดสอบ ซึ่งสัญญาณที่ใช้ทดสอบนี้ทางเครื่องรับต้องสามารถสร้างใหม่ได้ง่าย และ ง่ายต่อการซิงโครไนซ์ทั้งเครื่องส่งและเครื่องรับ

ตารางตัวอย่างพารามิเตอร์ช่องสัญญาณของวงจรเช่า(ย่านความถี่เสียง)ที่ใช้สื่อสารข้อมูล

Parameter	CCITT Recommendation M. 1020	Bell System Technical Reference Pub 41004
Overall Loss	X	X
Loss Variation	X	X
Attenuation Distortion	X	X
Envelope Delay Distortion (Group Delay Distortion)	X	X
Random Circuit Noise	X	
Signal to Noise Ratio		X
Quantizing Noise	X	
Impulse Noise	X	X
Phase Jitter	X	X
Single Frequency Interference	X	X
Frequency Shift	X	X
Non Linear Distortion		X
Harmonic Distortion	X	
Echo		X

รูปที่ 12 ตัวอย่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณที่จำเป็นต้องระบุกำหนดโดยองค์กรทางโทรคมนาคมต่าง ๆ

การที่จะได้ค่าตัวแปรของช่องสัญญาณ (channel) นั้น สามารถทำได้โดยส่งสัญญาณรูปไซน์ซึ่งมีค่าสเปคตรัม ครอบคลุมแถบกว้างความถี่ (Banwidth) ของช่องสัญญาณ แล้ววัดลักษณะสมบัติของสัญญาณไซน์ (ขนาดและเฟส) ที่เปลี่ยนแปลงไป การเปรียบเทียบของสัญญาณไซน์ 2 ตัว คือ สัญญาณที่ส่งกับสัญญาณที่รับได้ ก็เพื่อแสดงลักษณะสมบัติของสัญญาณที่เกิดผิดพลาดไป มีวิธีการเปรียบเทียบ 2 วิธีคือ 1) การแปลงฟูเรียร์ 2) การใช้ครอสคอร์รีเลชั่น ฟังค์ชั่น ซึ่งต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ผล

2 โครงงานสร้างเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิท (BER Monitor)

2.1 หลักการทำงาน

การวัดอัตราความผิดพลาดบิทข้อมูลนี้ ใช้หลักการ คือ ส่งข้อมูลที่ทราบรูปแบบเข้าไปที่ปลายหนึ่งของระบบรับส่งข้อมูล แล้วนำเอาข้อมูลดังกล่าว ที่ส่งผ่านมายังอีกปลายหนึ่งของระบบ มาตรวจสอบหาจำนวนบิทข้อมูลที่ผิดพลาด เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราความผิดพลาดบิท (BER) สำหรับข้อมูลที่นำมาใช้ทดสอบคือลำดับสุ่มเทียม (PRBS) เนื่องครอบคลุมรูปแบบของสัญญาณที่เป็นไปได้ทั้งหมด และขจัดปัญหาในเรื่องรูปแบบสัญญาณที่อาจเป็นประโยชน์หรือโทษแก่ระบบรับส่งข้อมูลที่จะทดสอบ

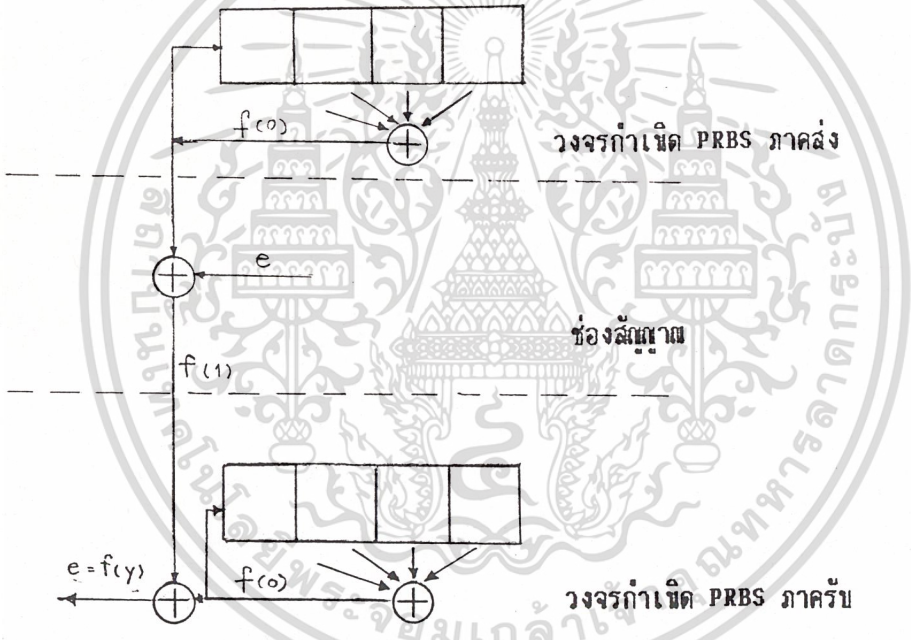
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลเชิงเลขที่ใช้ทดสอบ อาจใช้การอ่านจากหน่วยความจำก็ได้ แต่ในที่นี้เราเลือกใช้ PRBS เนื่องจากข้อได้เปรียบบางประการดังนี้

1. รูปแบบของข้อมูลแบบนี้ มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลแบบสุ่มจริง ๆ (เช่นจำนวนของบิท 1 และ บิท 0 มีค่าพอ ๆ กัน) ซึ่งเป็นลักษณะปกติของข้อมูลในการสื่อสารข้อมูลทั่วไป
2. สามารถสร้างได้ง่าย โดยใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง คือรีจิสเตอร์เลื่อน รวมทั้งมีความเชื่อถือได้สูง

<u>เทคนิคของระบบที่เราใช้</u>

เทคนิคของระบบเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิทของเรามีลักษณะเป็นดังนี้



รูปที่ 13 แผนภาพระบบเครื่องวัดอัตราความผิดพลาดบิท

สามารถอธิบายได้ด้วยสมการง่าย ๆ ดังนี้

ข้อมูลที่สร้างจาก วงจรกำเนิด PRBS ทางด้านส่ง คือ f(0) เมื่อส่งมาตามช่องสัญญาณจะเกิดความผิดพลาดขึ้นเป็น

$$f(1) = f(0) + e \qquad [14]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

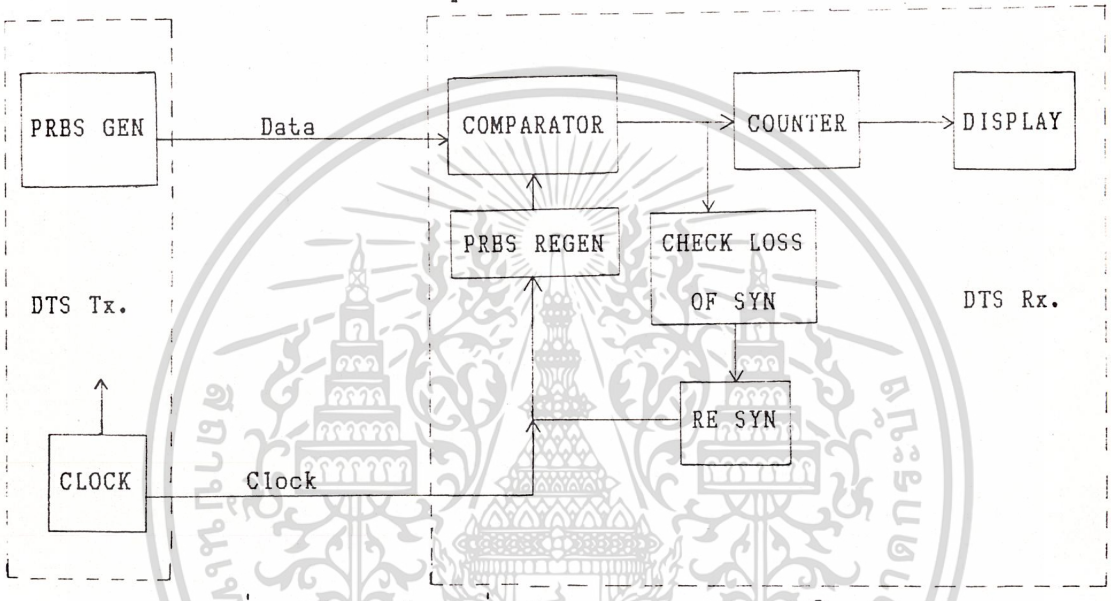
ทางด้านรับจะนำ f(1) มาเปรียบเทียบกับ f(0) ที่สร้างขึ้นจากทางด้านรับได้เป็น

$$f(y) = f(1) + f(0)$$

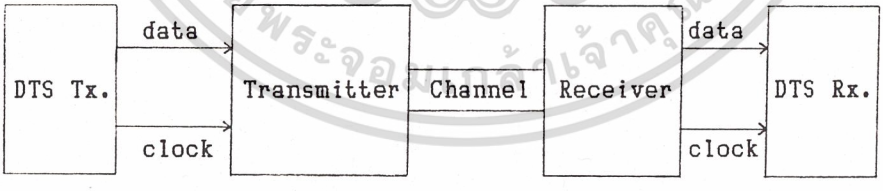
$$= f(0) + e + f(0)$$

$$= e \quad \because \text{เป็นการบวกแบบโมดูโล 2}$$

โครงสร้างอย่างง่ายแสดงดังรูป



รูปที่ 14 โครงสร้างเครื่องวัดและแบบจำลองการวัดโดยตรง



รูปที่ 15 การต่อเครื่องวัดกับระบบสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการวัดอัตราความผิดพลาดโดยตรง ประกอบด้วยหลายส่วน ซึ่งสามารถอธิบายหน้าที่ของวงจรได้ดังนี้

1. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของเครื่องวัด

2. วงจรกำเนิด PRBS ภาคส่ง (PRBS GEN) ทำหน้าที่สร้างลำดับสุ่มเทียม เพื่อส่งเข้าไปในระบบรับส่งข้อมูลที่ต้องการทดสอบคุณภาพ อัตราข้อมูลที่ส่งขึ้นกับสัญญาณนาฬิกา

3. วงจรกำเนิด PRBS ภาครับ (PRBS REGEN) ทำหน้าที่สร้างลำดับสุ่มเทียม แบบเดียวกับในภาคส่งเพื่อใช้อ้างอิงว่าข้อมูลที่ได้รับ (จากระบบรับส่งข้อมูล) นั้นมีบิทใดผิดไปจากเดิมหรือไม่

4. วงจรซิงโครไนซ์ข้อมูล (Synchronization) ทำหน้าที่ทำให้ลำดับสุ่มเทียม ที่ถูกสร้างขึ้นในภาครับมีลำดับตรงกันกับข้อมูลที่ได้รับเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบข้อมูล

5. วงจรเปรียบเทียบข้อมูล (Comparator) ทำหน้าที่เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้รับจากระบบรับส่งข้อมูลกับข้อมูลที่สร้างขึ้นในภาครับเพื่อหาบิทข้อมูลที่ผิดพลาด

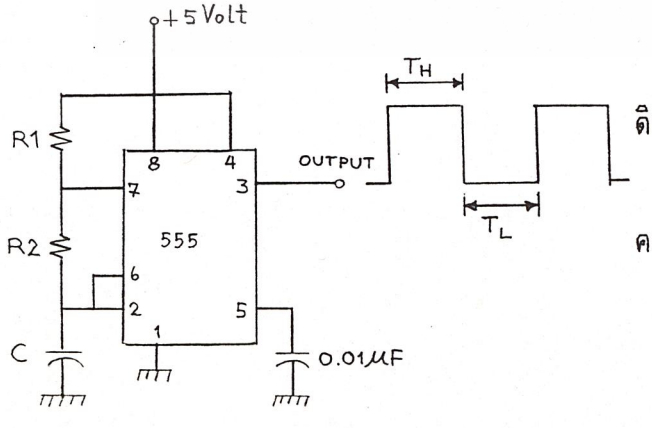
6. วงจรนับ (Counter) ทำหน้าที่นับจำนวนบิทข้อมูลที่ผิดพลาดระหว่างการทดสอบ

7. วงจรแสดงผล (Display) ทำหน้าที่แสดงจำนวนบิทข้อมูลที่ผิดพลาดให้ผู้ทดสอบทราบ

8. วงจรตรวจจับการหลุดซิงโครไนซ์ ทำหน้าที่คอยตรวจสอบดูว่าข้อมูลที่ถูกสร้างในภาครับกับข้อมูลที่ได้รับจากระบบรับส่งข้อมูลซิงโครไนซ์กันหรือไม่ ถ้าไม่ วงจรนี้จะสั่งให้วงจรซิงโครไนซ์ทำการซิง-โครไนซ์ข้อมูล

2.2 <u>การออกแบบวงจรต่าง ๆ</u>

<u>1.วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา</u> เป็นตัวกำหนดความเร็ว ของการส่งข้อมูล ค่าที่ใช้ทดลองนี้มีค่า ~ 1KHZ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอัตราการสื่อสาร 1,000 bps แต่ที่นิยมใช้ในการสื่อสารข้อมูลทั่วไปคือ 1200, 2400, 4800, 9600 bps



ดิวตี้ ไซเคิล $= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 100\ \%$

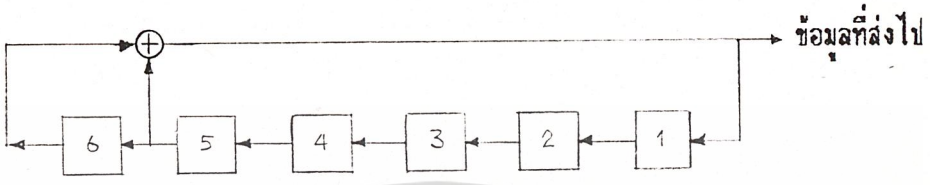
ความถี่ $= \frac{1.46}{(R_1 + 2R_2)\, C}$

$T_H = 0.685\ (R_1 + R_2)\ C$

$T_L = 0.685\ (R_2\ C)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

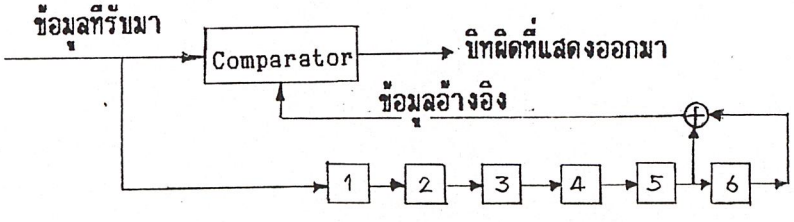
2.วงจรกำเนิด PRBS ภาคส่ง ทำหน้าที่สร้างลำดับสุ่มเทียมทางภาคส่ง ซึ่งสร้างได้โดยใช้รีจิสเตอร์ที่มีการป้อนกลับแบบเชิงเส้น (Linear Feedback Shift Register-LFSR) ในการทดลองนี้ใช้จำนวนภาคของรีจิสเตอร์ จำนวน 6 ภาคและมีรูปแบบการป้อนกลับกำหนดโดย ไพรมิทีฟ โพลิโนเมียล h(x) คือ $h(x) = x^6+x+1$ (คาบ = 63) แสดงดังรูป



รูปที่ 16 แสดง วงจรกำเนิด PRBS ภาคส่ง

ถ้าจำนวนภาคของรีจิสเตอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ข้อมูลที่ได้ (Transmitted Data) มีลักษณะเข้าใกล้สุ่มจริงมากขึ้น แต่มีข้อเสียคือจะทำให้วงจรซิงโครไนซ์มี ความซับซ้อนเพิ่มด้วย จำนวนภาคที่นิยมใช้กรณีอัตราการสื่อสารต่ำ ๆ คือ m = 6,9,11(คาบ = 63,511,2047)

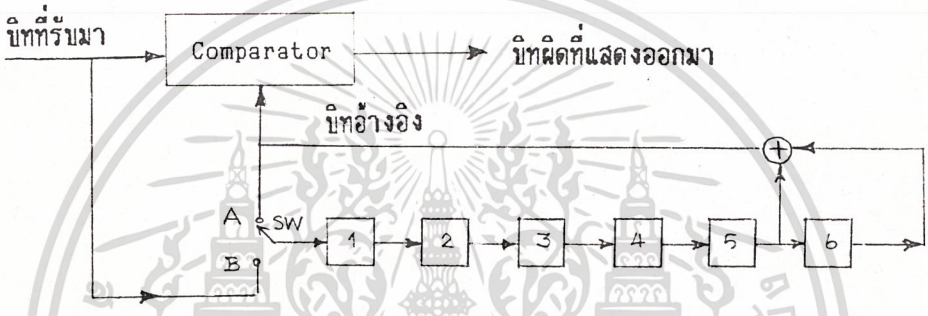
3.วงจรกำเนิด PRBS ภาครับ ทำหน้าที่สร้างลำดับสุ่มเทียมแบบเดียวกับภาคส่ง เพื่อใช้อ้างอิงกับข้อมูลที่ได้รับจากระบบรับส่งข้อมูลว่ามีบิทใดผิดบ้าง สิ่งสำคัญในการเปรียบเทียบคือลำดับบิทข้อมูลที่สร้างโดย วงจรกำเนิด PRBS ภาครับและภาคส่ง ต้องมีลำดับบิทตรงกัน ซึ่งเรียกว่าเกิดการซิงโครไนซ์ (Synchronization) ซึ่งเป็นหน้าที่ของเครื่องรับ ที่จะต้องซิงโครไนซ์ข้อมูลทั้งสองให้มีลำดับบิทตรงกัน วิธีที่จะซิงโครไนซ์ได้ง่ายได้แก่การใช้ LFSR ต่อตรงข้ามกับ LFSR ในภาคส่ง แล้วทำการโหลดข้อมูลที่ได้รับจำนวน m บิท แก่ LFSR จากนั้นมันจะผลิตบิทข้อมูลอ้างอิงที่ตรงกับบิทข้อมูลของภาคส่ง วงจรกำเนิด PRBS ภาครับแบบนี้เรียกว่าแบบซิงโครไนซ์เอง (Self-Synchronized) หรือ แบบอัตโนมัติ (Automatic Mode) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงวงจร วงจรกำเนิด PRBS ภาครับ แบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกำเนิด PRBS ภาครับ แบบอัตโนมัติ มีข้อดีคือสามารถซิงโครไนซ์ได้เร็ว และทำได้เอง ไม่จำเป็นต้องมีวงจรซิงโครไนซ์ แต่ข้อเสียคือค่าบิทผิดที่แสดงออกมา(Error Indication) ไม่ใช่ค่าบิทผิดที่เกิดขึ้นจริงเช่น เกิดบิทผิด 1 บิท แต่บิทผิดที่แสดงออกมามีค่า x+1 บิทเมื่อ x คือจำนวนเส้นที่ต่อออกมา (tap)จาก LFSR เพื่อแก้ปัญหาการแสดงค่าบิทผิดพลาด ที่ไม่ตรงกับที่เกิดจริง จึงมีการปรับปรุงวงจร PRBS ภาครับใหม่ ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงวงจรกำเนิด PRBS ภาครับ แบบไม่อัตโนมัติ (Manual Mode)

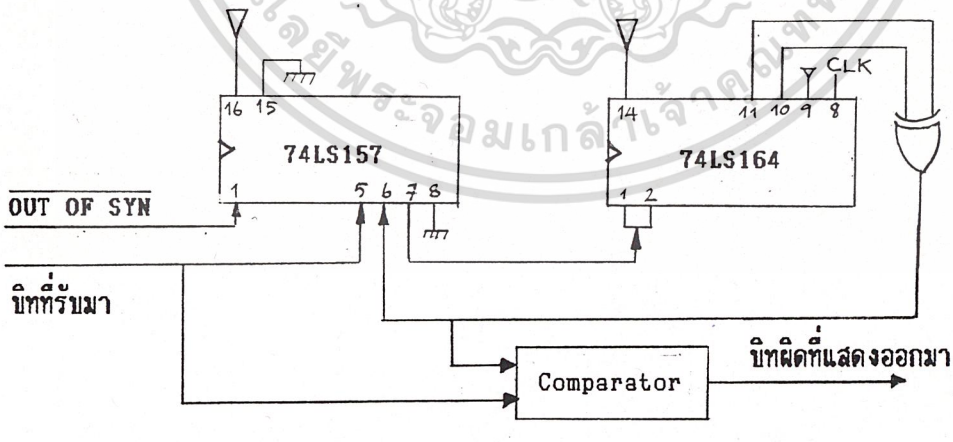
การทำงานเริ่มแรก คือกด sw ไป B เป็นเวลาชั่วครู่ ซึ่งตอนนี้ก็เหมือนกรณีอัตโนมัติ จะทำให้เกิดบิตข้อมูลอ้างอิงที่ภาครับ ซิงโครไนซ์กับบิทข้อมูลภาคส่ง จากนั้นกด sw ไปยัง A จะทำให้ วงจรกำเนิด PRBS ภาครับ ทำงานโดยอิสระไม่ขึ้นกับบิทผิดพลาดที่อาจเข้ามารบกวนการทำงานของวงจรในกรณีนี้บิทผิดที่แสดงมีค่าเท่ากับบิทผิดที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากบิทที่ได้รับมา (Received Data) มีการหายไปหรือถูกเพิ่มเข้ามาซึ่งเรียกว่าเกิด "การเลื่อนบิท"(Bit slip) จะทำให้เกิดการหลุดซิงโครไนซ์ดังนั้นจึงต้องทำการซิงโครไนซ์ใหม่ โดยการกด sw ไปยัง B เป็นเวลาชั่วครู่ แล้วกลับมายัง A ดังได้อธิบายแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.วงจรเปรียบเทียบข้อมูล วงจรเปรียบเทียบทำการเปรียบเทียบบิท 2 บิท คือบิทอ้างอิง และบิทที่รับมาได้ ดังนั้นจึงใช้ เอ็กซคลูซีฟออร์ เกต (Exclusive-or gate) ธรรมดา ผลของการเปรียบเทียบ คือ หากบิทแสดงความผิดพลาด (Error Indication) มีค่า "1" แสดงว่าเกิดบิทผิดพลาดเนื่องจากระบบรับส่งข้อมูลแล้ว

รูปที่ 19 วงจรเปรียบเทียบข้อมูล หรือ เอ็กซคลูซีฟออร์ เกต

5.วงจรซิงโครไนซ์ จากที่ผ่านมาวงจรกำเนิด PRBS ภาครับ แบบไม่อัตโนมัติ จำเป็นต้องมีการซิงโครไนซ์ใหม่หากเกิดการหลุดซิงโครไนซ์ ดังนั้นสวิทช์จึงทำหน้าที่เป็นวงจรซิงโครไนซ์นั่นเอง แต่ในการทดลองใช้ IC 74LS157 เป็นสวิทช์ที่ถูกควบคุมการผลักสวิทช์ด้วยสัญญาณหลุดซิงโครไนซ์ (Out of Syn)



รูปที่ 20 แสดงการต่อวงจรซิงโครไนซ์กับวงจรกำเนิด PRBS ภาครับ

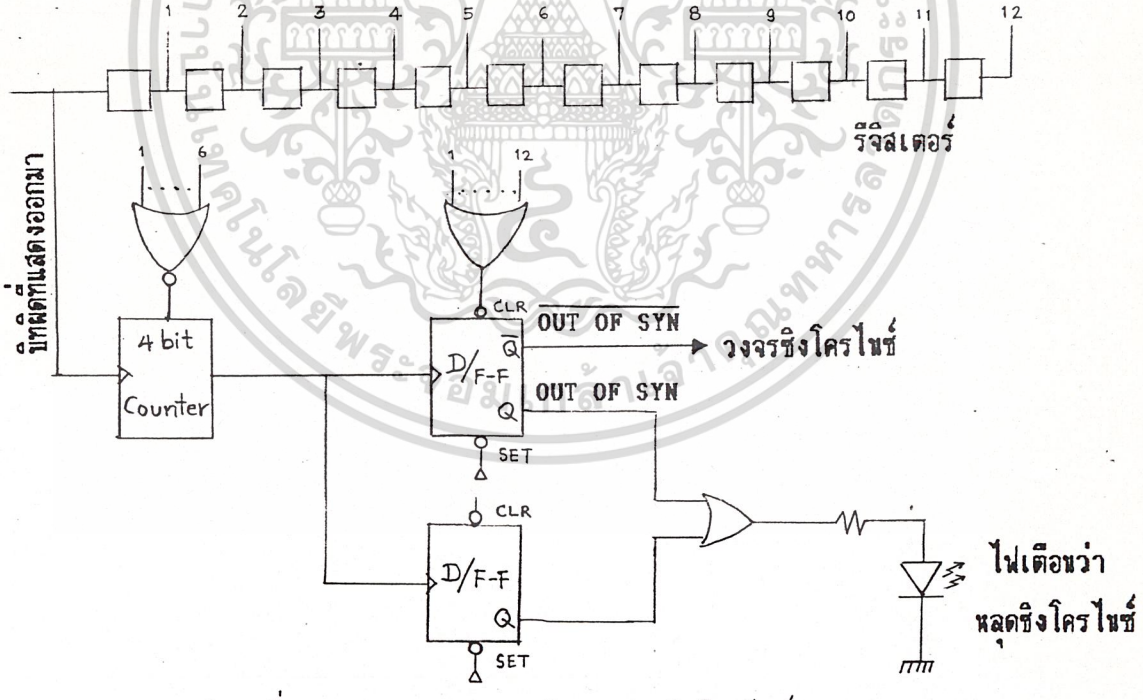
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.วงจรตรวจจับการหลุดซิงโครไนซ์ หน้าที่ของวงจรนี้ จะทำการตรวจสอบดูว่า บิทข้อมูลที่ส่งและบิทข้อมูลอ้างอิงมีลำดับบิทตรงกันหรือไม่ ถ้าไม่ตรงกัน จะทำการส่งสัญญาณ Out of Syn ไปควบคุมสวิทช์ IC 74157 ให้ทำการซิงโครไนซ์ข้อมูลใหม่ ขณะที่ข้อมูลกำลังซิงโครไนซ์กันนั้น จำนวนบิทผิดที่ตรวจพบจะน้อยมาก ถึงแม้ว่าระบบรับส่งข้อมูลจะเลวมากก็ตาม แต่ในขณะที่ข้อมูลไม่ซิงโครไนซ์กันนั้น เครื่องวัดจะตรวจพบบิทผิดได้มากมาย เช่น พบบิทผิด 2000 บิท ต่อบิทที่ได้รับ 10,000 บิท ฉะนั้นจึงได้มีการกำหนดสภาพการซิงโครไนซ์ ดังนี้

1) ข้อมูลหลุดจากการซิงโครไนซ์ เมื่อตรวจไม่พบบิทดี 6 บิทติดต่อกัน จนกระทั่งนับบิทผิดได้ถึง 15 บิท

2) ข้อมูลกำลังซิงโครไนซ์กันอยู่ เมื่อสามารถตรวจพบบิทที่ไม่ผิดพลาดจำนวน 6 บิท ติดต่อกันแต่ในการทดลองใช้ตรวจบิทที่ไม่ผิดพลาดจำนวน 12 บิท แทนเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวัด

ค่าตัวเลขต่าง ๆ ที่กำหนดนั้น ได้มาจากการวิเคราะห์คุณสมบัติค่า ออโตคอร์รีเลชั่น ฟังค์ชั่นของ สัญญาณเชิงเลขที่มีลักษณะเป็นคาบ หรือ PRBS นั่นเองวงจรแสดงดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงวงจรตรวจจับการหลุดซิงโครไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังการซิงโครไนซ์ใหม่แล้ว ถ้าพบว่า

1) อัตราความผิดพลาดลดลงทันที แสดงว่าก่อนหน้านั้นเกิดการหลุดซิงโครไนซ์

2) อัตราความผิดพลาดยังคงมีค่ามากอยู่อีก แสดงว่า

- นั่นคือ อัตราความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริง (มีค่าสูงมากไม่ว่าเวลาใดก็ตาม)
- ยังคงเกิดการหลุดซิงโครไนซ์อยู่อีก ต้องทำการซิงโครไนซ์ใหม่

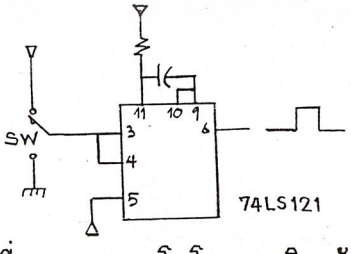
7 วงจรนับและแสดงผล

ใช้นับจำนวนบิทข้อมูลที่ผิดพลาดโดยสามารถนับได้ 10,000 บิท และแสดงผลออกมาทาง LED 7-ส่วน 4 หลัก โดยใช้ IC 74LS390 เป็นตัวนับ 100 x 100 = 10,000 บิท และ IC 74LS47 ทำการแปลงรหัสจาก บีซีดี ให้เป็นรหัส 7-ส่วน แล้วแสดงผลออกทาง LED 7-ส่วน ชนิด แอโนดร่วม (Common Anode - C.A.)

รูปที่ 22 วงจรนับและแสดงผล

2.3 วิธีการทดลองตอนที่ 1 ทดสอบทั้งระบบ

1. ต่อวงจรสมบูรณ์ดังรูป
2. ใช้วงจร โมโนสเตเบิล แทน สัญญาณนาฬิกา ในการทดสอบแต่ละสถานะของวงจร



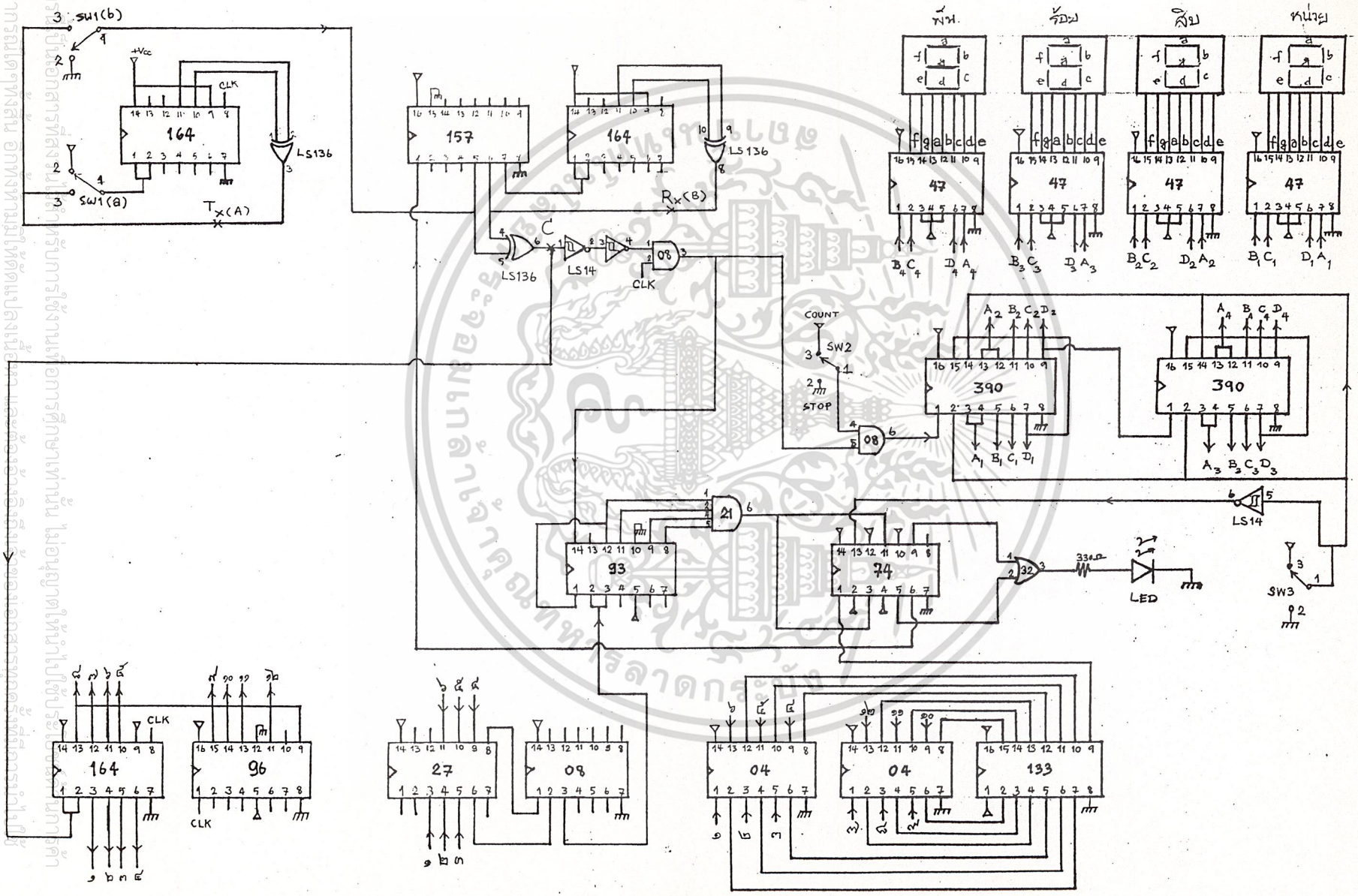
กด Sw 1 ครั้ง
ได้สัญญาณนาฬิกา 1 ลูก

รูปที่ 23 วงจร โมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการวัดสถานะของ รีจิสเตอร์ (ที่ใช้สร้างข้อมูล PRBS) ทุกสถานะทั้งภาคส่งและภาครับ รวมทั้งวัดสถานะ ณ ตำแหน่ง T_x(A), R_x(B) และ C ในวงจรสมบูรณ์โดยใช้ลอจิกเทรนเนอร์ (Logic Trainer) ซึ่งในที่นี้ T_x(A) คือข้อมูล PRBS ที่ถูกสร้างออกมาจากภาคส่ง, R_x(B) คือข้อมูล PRBS ที่สร้างจากภาครับ และ C คือ ค่าที่แสดงถึงความผิดพลาด (Error) แล้วบันทึกผลลงในตาราง
4. ทำการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial)วงจรภาคส่งโดยสับ sw1ไปตำแหน่ง 2 แล้วทำการป้อนสัญญาณนาฬิกา จากโมโนสเตเบิล ให้จนครบ 6 ลูก แล้ว sw1 กลับไปตำแหน่ง 3 ในขณะป้อนสัญญาณนาฬิกา แต่ละลูกให้ทำตามข้อ 3 ด้วย
5. ทำการป้อน สัญญาณนาฬิกา ต่อไปอีกประมาณ 50-60 ลูก การป้อนแต่ละลูกก็ให้ทำตามข้อ 3
6. ถอดวงจรโมโนสเตเบิลออก นำวงจรอะสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ ความถี่ 1 KHz มาใส่แทน แล้วทำการกำหนดค่าเริ่มต้นวงจรภาคส่งใหม่ โดยกด sw1 ไปตำแหน่ง 2 ซักครู่แล้วกลับมายังตำแหน่ง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปวงจรสมบูรณ์

2.4 ผลการทดลองตอนที่ 1

CLK	สถานะในรีจีสเตอร์ภาคส่ง 1	2	3	4	5	6	A	สถานะในรีจีสเตอร์ภาครับ 1	2	3	4	5	6	B	C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	กำหนดค่าเริ่มต้น ภาคส่ง
3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	sw1อยู่ณ ตำแหน่ง2
4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	← สับsw1ไปยัง3
7	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	อยู่ในระหว่างการ
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ตรวจจับการหลุด
13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ซิงโครไนซ์
14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
17	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
18	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
22	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
23	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
24	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
26	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
27	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
28	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
29	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
30	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
31	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	อยู่ในระหว่างการ			
32	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ตรวจจับการหลุด			
33	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ซิงโครไนซ์			
34	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
35	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
36	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
37	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
38	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
39	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
40	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1				
41	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
42	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
43	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	เริ่มทำการซิง			
44	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	โครไนซ์ใหม่			
45	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1		
47	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	← ลำดับข้อมูลตรงกันแล้ว	
48	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	
49	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	
50	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	อยู่ในระหว่างตรวจว่า
																ข้อมูลซิงโครไนซ์กันแล้ว
51	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	หรือยัง
52	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	
53	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	
54	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	
55	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	
56	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	
57	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	
58	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	← เลิกทำการซิงโครไนซ์
59	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	
60	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	
61	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	
62	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	
63	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	ข้อมูลซิงโครไนซ์กันแล้ว
64	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	
65	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางผลการทดลองในช่วงเวลา CLK ลูกที่ 1-6 เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นสถานะของรีจิสเตอร์ในภาคส่ง ให้มีสถานะเริ่มแรก คือ 111111 แล้วทำการส่งไปยังภาครับ ในขณะเดียวกันสถานะของรีจิสเตอร์นภาครับ จะมีสถานะ 000000 หมด ซึ่งจะเห็นได้ว่าบิทข้อมูลของภาคส่ง และภาครับมีลำดับข้อมูลที่ไม่ตรงกันทำให้เกิดการหลุดซิงโครไนซ์ ซึ่งสามารถตรวจพบบิทผิดได้เป็นจำนวนมากในเวลานี้ ทำให้วงจรตรวจจับการหลุดซิงโครไนซ์ ทำงานทันทีในช่วง CLK ลูกที่ 6-43 และใน CLK ลูกที่ 43 วงจรตรวจจับการหลุดซิงโครไนซ์ จะทำการตัดสินใจให้มีการทำซิงโครไนซ์ใหม่ โดยจะเกิดสัญญาณ $\overline{\text{Out of Syn}}$ = LOW ไปควบคุมวงจรซิงโครไนซ์ ในระหว่าง CLK ลูกที่ 43 ถึง 58 วงจรซิงโครไนซ์จะทำการซิงโครไนซ์ข้อมูลให้มีลำดับตรงกัน และในระหว่าง CLK ลูกที่ 43 ถึง 58 วงจรตรวจจับว่าเกิดการซิงโครไนซ์ขึ้นหรือยังก็จะทำงานพร้อมกันด้วย เมื่อถึง CLK ลูกที่ 58 วงจรตรวจจับว่าเกิดการซิงโครไนซ์ ก็สามารถตัดสินใจได้ว่า ขณะนี้ข้อมูลซิงโครไนซ์กันแล้วและจะทำการส่งสัญญาณ $\overline{\text{Out of Syn}}$ = HIGH ไปให้วงจรซิงโครไนซ์เลิกการทำงาน ข้อมูลที่ตามต่อมา ก็จะซิงโครไนซ์กัน ถ้าหากเกิดการหลุดซิงโครไนซ์ ก็จะมีการเริ่มกระบวนการการตรวจจับการหลุดซิงโครไนซ์ใหม่

จะเห็นว่าผลการทดลองสอดคล้องกับวงจรที่ได้ออกแบบมาแล้วทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 วิธีการทดลองตอนที่ 2 ทดลองวัดอัตราความผิดพลาดบิท

1. ต่อวงจร ตามวงจรสมบูรณ์
2. ป้อนไฟเลี้ยง, สัญญาณนาฬิกา (1 KHz.) ให้แก่ทุกส่วนในวงจร
3. ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นวงจรภาคส่ง โดยการกดSw.1<a,b>ไปยังตำแหน่ง2เป็นเวลา1วินาที แล้วสับSw.กลับมายังตำแหน่ง3
4. ที่วงจรภาครับจะปรากฏไฟ LED สว่าง แสดงว่าเกิดการหลุดซิงโครไนซ์ ดังนั้นให้ทำการตรวจสอบว่า วงจรซิงโครไนซ์กันใหม่หรือยัง โดยกด Sw3 ไปยังตำแหน่ง 3" ถ้าหากว่าไฟ LED ยังคงติดอยู่ แสดงว่ายังคงหลุดซิงโครไนซ์ แต่ถ้าไฟ LED ดับ แสดงว่าวงจรซิงโครไนซ์กันใหม่เรียบร้อยแล้ว ในขณะเดียวกัน Sw3 ที่อยู่ตำแหน่ง3"จะทำการรีเซตวงจรนับให้เป็นศูนย์ เพื่อไม่ให้ข้อมูลที่ไม่ถูกต้องขณะเกิดการหลุดซิงโครไนซ์ไปปรากฏบนจอแสดงผล
5. เมื่อข้อมูลซิงโครไนซ์กันแล้ว ไฟ LED จะดับ ให้สับ Sw3 กลับไปยังตำแหน่ง3" จะเป็นการเริ่มการทำการนับข้อมูลที่ผิดพลาดที่แท้จริง และให้ทำการจับเวลาไปพร้อมกันด้วย
6. เมื่อจอแสดงผลจำนวนบิทผิดได้จำนวน x บิท ภายในเวลา t วินาที โดยในช่วงนี้ไม่มีการหลุดซิงโครไนซ์(ไฟLEDไม่สว่าง) ก็ให้ทำการหยุดนับได้โดยการกด Sw2 ไปยังตำแหน่ง 2" ซึ่งจะทำให้การนับหยุดลงทันที และสามารถคำนวณอัตราความผิดพลาดบิทได้ดังนี้คือ

อัตราความผิดพลาดบิท = x/[t*1K]

เมื่อ x = จำนวนบิทผิดพลาดที่แสดงบนจอ (บิท)

t = เวลาที่นับจนกระทั่งได้บิทผิด x บิท (วินาที)

1K = ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ (เฮิร์ทซ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ผลการทดลองตอนที่ 2

x	3 บิท
t	2 นาที

2.8 วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 2

อัตราความผิดพลาดบิท = x/[t*1k]

= 3/[120*1000]

= $2.5*10^{-5}$

โดยในระหว่างนี้ไม่มีการหลุดซิงโครไนซ์เลย โดยทั่วๆไป ยอมให้มี BER < 10^{-5}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 สรุป

จะเห็นว่าในระบบการสื่อสารใดๆก็ตาม การเสื่อมลง, การเสียของอุปกรณ์เกิดขึ้นได้เสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบอุปกรณ์โทรคมนาคมอยู่เสมอๆ เพราะถ้าหากไม่รีบแก้ไขอาจนำความเสียหายมาสู่ผู้ใช้บริการและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ปริญญานิพนธ์นี้ เป็นเพียงการศึกษาหลักการทำงานเบื้องต้น ของการวัดอัตราความผิดพลาดข้อมูล (โดยวัดเป็นจำนวนบิทที่ผิดพลาด) ซึ่งหัวใจสำคัญของการทำงานอยู่ที่ตัวรีจิสเตอร์ที่มีการป้อนกลับแบบเชิงเส้น (Linear Feedback Shift Register - LFSR) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตลำดับสุ่มเทียม (PRBS)

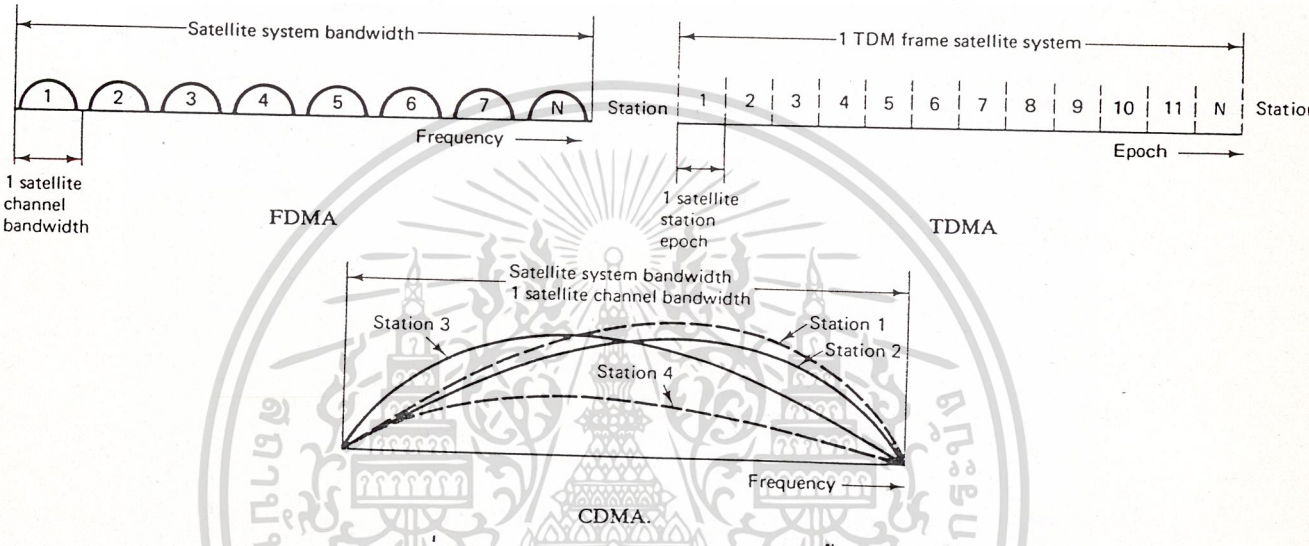
ลำดับสุ่มเทียมนี้ มีการนำไปประยุกต์ใช้ ในทางสื่อสารโทรคมนาคมมากมาย เช่น Modulation, Radar-ranging, Scrambling, Code Division Multiple Access ฯลฯ โดยเฉพาะระบบสื่อสารแบบ "แผ่กระจายความถี่" (Spread Spectrum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก A

C D M A (Code-Division Multiple Access)

CDMA เป็นเทคนิคในการ Multiple Access อย่างหนึ่งในระบบสื่อสารดาวเทียม นอกเหนือไปจาก FDMA (Frequency DMA) และ TDMA (Time DMA) รูปที่ A1 แสดงการจัด Multiple Access ทั้ง 3 แบบ



รูปที่ A1 การ Multiple Access ทั้ง 3 แบบ

การที่เรากล่าวถึง CDMA เนื่องจากนี่เป็นตัวอย่างหนึ่งของการนำ PRBS มาประยุกต์ใช้งาน

ลักษณะทั่วไปของ CDMA

ผู้ใช้(สถานีภาคพื้นดิน)ทุกคนสามารถใช้แบนด์วิดท์ของทรานสปอนเดอร์ได้อย่างเต็มที่ และตลอดเวลา หลักการคร่าวๆก็คือ ทางด้านส่งและด้านรับจะรู้รหัสเฉพาะตัวที่เหมือนกันทั้ง 2 ฝ่าย ด้านส่งจะนำรหัสนี้ไปใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลแล้วส่งออกไป ส่วนทางด้านรับเมื่อใดมีกระบวนการซิงโครไนซ์อย่างถูกต้องก็จะสามารถตรวจจับและรับข้อมูลได้โดยอาศัยรหัสดังกล่าวในการถอดรหัสเพื่อให้ได้ข้อมูลข่าวสารเดิม จะเห็นได้ว่าระบบโครงข่ายแบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีสถานีกลางในการควบคุม และมีเพียงคู่สถานีเท่านั้นที่จะสามารถติดต่อสื่อสารกันได้

ทางด้านสถานีรับแต่ละแห่งจะมีรหัสประจำตัวเอง ที่เรียกว่า แอดเดรส (Address) ส่วนทางด้านส่ง เมื่อต้องการส่งให้กับสถานีรับใด ๆ ก็จะนำเอาแอดเดรสของสถานีรับนั้น มาทำการมอดูเลตกับข้อมูลที่ต้องการส่งแล้วจึงส่งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

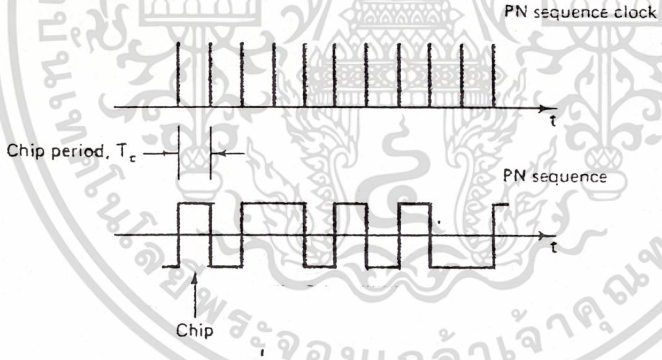
ถึงแม้ว่าจุดประสงค์ (การรักษาความลับข้อมูล และ ความสามารถในการต่อต้านการแจม-Jamming คือการส่งคลื่นกำลังสูงเพื่อบดบังสัญญาณที่อ่อนกว่า) ของการใช้ระบบสื่อสารแบบสเปรดสเปกตรัมจะต่างไปจาก CDMA ก็ตาม แต่ระบบสื่อสารทั้งสองแบบนี้ใช้เทคนิคเดียวกัน

เทคนิคในการรับส่งสัญญาณแบบสเปรดสเปคตรัม มีหลายแบบ เช่น ไดเรคต์ ซีเควนซ์ พซูโดนอยส์ (Direct Sequence Pseudonoise), ฟรีเควนซี ฮอปปิ้ง (Frequency Hopping), ไทม์ ฮอปปิ้ง (Time Hopping), ระบบเชิร์ป (Chirp System)

หลักการทำงานของ CDMA

เนื่องจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของ PRBS มีหลายอย่างที่เป็นคุณสมบัติของ สัญญาณรบกวนแถบกว้าง (Wide Band Noise) ดังนั้นในหนังสือบางเล่มจะใช้คำว่า Pseudonoise หรือ PN Sequence แต่ในที่นี้เราจะขอใช้ PRBS เหมือนเดิมเพื่อหลีกเลี่ยงความสับสน

พิจารณารูปที่ A2 จะเห็นว่า PRBS นี้อยู่ภายใต้อัตราสัญญาณนาฬิกาค่าหนึ่ง สำหรับคำว่าบิทในสัญญาณเชิงเลขทั่วไป จะหมายถึงชิป ของ PRBS อัตราสัญญาณนาฬิกามีหน่วยเป็น จำนวนชิปต่อวินาที (Chips per Second-cps)



รูปที่ A2 แสดงลำดับ PRBS

รูปที่ A3 แสดงแผนภาพบล็อกอย่างง่ายของระบบ CDMA เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจเราจะพิจารณาแยกออกเป็นภาค มอดูเลทข้อมูลและมอดูเลทรหัส คลื่นพาหะที่มอดูเลทกับข้อมูลแทนด้วย $A \cos [wt + \phi(t)]$ โดยที่ $\phi(t)$ คือ การมอดูเลทเฟส สัญญาณดังกล่าวจะผ่านเข้าไปยังวงจรบาลานซ์ มอดูเลเตอร์ เพื่อทำการมอดูเลทรหัส รหัสที่ใช้มอดูเลทก็คือ PRBS นั่นเอง เราจะแทน PRBS ด้วยสัญญลักษณ์ $P_{PN}(t)$ เอาท์พุทที่ออกจากบาลานซ์มอดูเลเตอร์คือ

$$e_T = P_{PN}(t) A \cos [wt + \phi(t) \quad [1]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

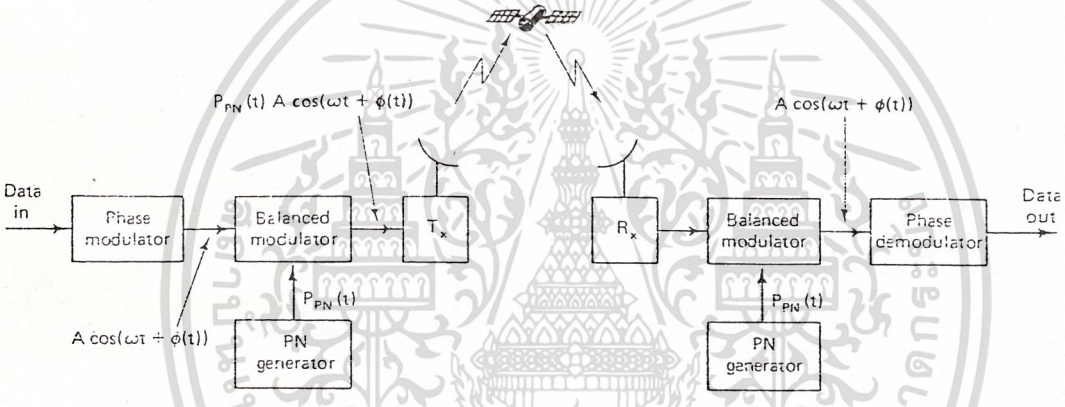
เมื่อสัญญาณนี้ถูกส่งไปด้านรับ สัญญาณนี้จะถูกคูณกับ PRBS ที่สร้างขึ้นจากเครื่องรับ โดยที่รูปแบบของ PRBS ทั้งด้านส่ง, ด้านรับจะเหมือนกัน สมมติว่ากระบวนการซิงโครไนซ์ระหว่างเครื่องรับและส่งเป็นไปอย่างถูกต้อง เอาท์พุทของบาลานซ์มอดูเลเตอร์ของเครื่องรับจะเป็น

$$e_R = P^2_{PN}(t)\, A \cos [wt + \phi(t)] \qquad [2]$$

เนื่องจาก $P_{PN}(t)$ เป็นสัญญาณเลขฐานสอง จึงทำให้ $P^2_{PN}(t) = 1$ ดังนั้น เอาท์พุทจากบาลานซ์ มอดูเลเตอร์ จึงกลายเป็น

$$e_R = A \cos [wt + \phi(t)] \qquad [3]$$

สัญญาณที่ได้เมื่อผ่านการดีมอดูเลททางเฟส ก็จะได้ข้อมูลข่าวสารที่ต้องการ



รูปที่ A3 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบ CDMA

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่า ถ้ารหัสทางด้านส่งและด้านรับไม่ตรงกัน ซึ่งอาจเกิดจากการซิงโครไนซ์ไม่ดีพอ หรือเกิดจากทางด้านรับสร้างรหัสที่ผิดขึ้นมาก็ตาม จะทำให้สภาวะที่ $P^2_{PN}(t) =$ ไม่เกิดขึ้น และทำให้ผลของการมอดูเลทเฟสผิดพลาดเป็นผลให้ข้อมูลข่าวสารเสียหาย

ด้วยเหตุที่จำเป็นต้องมีการซิงโครไนซ์ที่ถูกต้อง ระหว่างรหัสทางด้านส่งและด้านรับจึงทำให้ CDMA ไม่เป็นที่นิยมใช้กันในทางธุรกิจและการพาณิชย์ต่าง ๆ แต่เนื่องจากข้อได้เปรียบอีกหลายประการระบบสเปรดสเปคตรัม CDMA นี้ ทำให้เป็นที่นิยมใช้ทางทหาร ข้อได้เปรียบดังกล่าวก็คือ ความสามารถในการกระจายกำลังของสัญญาณออกไปตลอดแบนด์วิดท์ที่กว้าง จึงทำให้ยากต่อการจารกรรมข่าวสารและรบกวนสัญญาณด้วยการแจม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานกำลังสูงของสัญญาณที่ถูกส่งมารบกวน (อันเกิดจากการแจม โดยผู้ไม่ประสงค์ดี) จะถูกลดลงด้วย ค่าตัวประกอบค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า โพรเซสซิ่ง เกน (Processing Gain) กำหนดโดยสมการ

$$G_P = T_b/T_c \qquad [4]$$

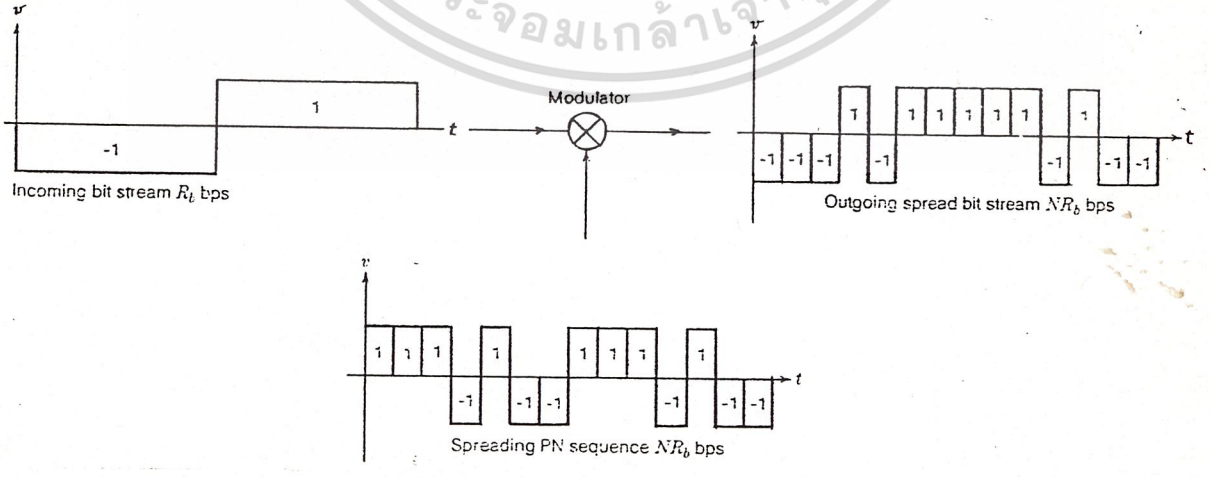
เมื่อ T_b แทนคาบเวลาบิทข้อมูลและ T_c แทนคาบเวลาชิป่ อัตราส่วนของสมการ [4] คือจำนวนชิป่ ต่อ บิท หรืออัตราส่วนระหว่าง อัตราของรหัสต่ออัตราข้อมูล และสุดท้ายคืออัตราส่วนของแบนด์วิดท์สเปรดสเปคตรัม ต่อ แบนด์วิดท์สัญญาณข้อมูล โดยทั่วไปอัตราส่วนนี้มีค่าอยู่ในช่วง 50-500

ถ้า E_J คือ พลังงานของสัญญาณที่มาแจม ซึ่งวัดที่อินพุทของด้านรับแล้ว พลังงานของสัญญาณแจมทางเอาท์พุทจะเป็น E_J/G_P หรือ $[E_J] - [G_P]$ dB เห็นได้ชัดเจนว่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะดีขึ้น อย่างไรก็ตามเทคนิคสเปรดสเปคตรัมนี้ ไม่สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทุกความถี่ เช่น สัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal Noise) ได้

การมอดูเลทรหัสโดยใช้ PRBS

กำหนดให้ลำดับของข้อมูลที่จะส่งมีอัตราบิทเท่ากับ R_b ถ้าการส่งเรามอดูเลทแบบ BPSK แล้วจะได้แบนด์วิดท์ของข้อมูลเป็น W_b ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ R_b

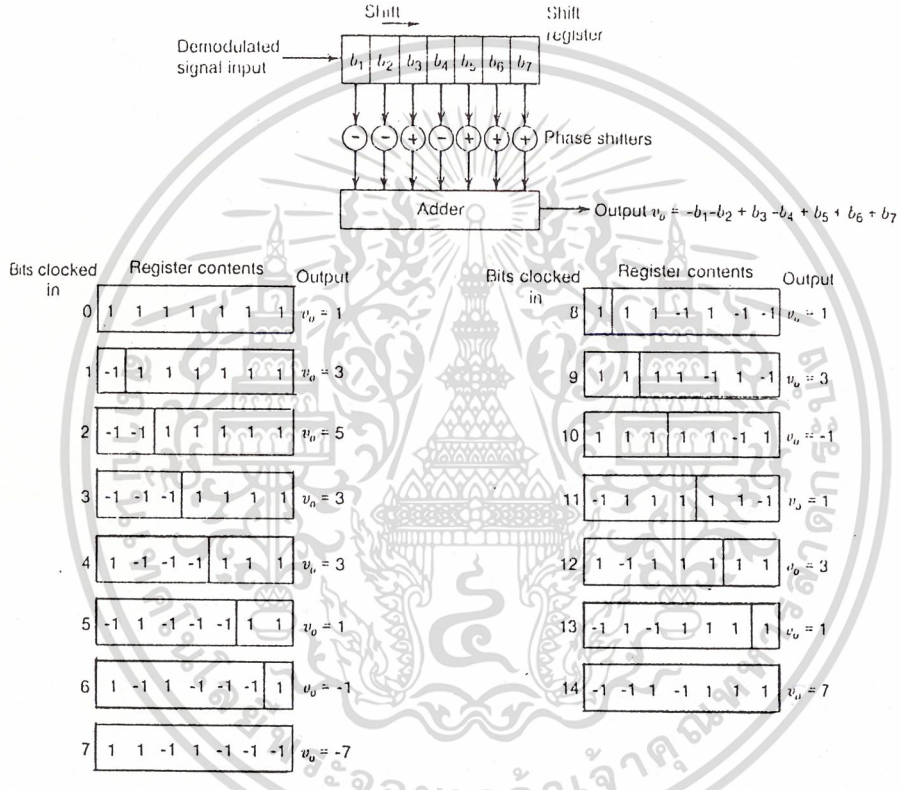
กลับมาพิจารณาที่ PRBS แต่ละบิทหรือแต่ละชิปที่ส่งออกไปจะเป็น +1 หรือ -1 ขึ้นกับข้อมูลภายใน PRBS ว่าเป็น 1 หรือ 0 (แทน 1 ด้วย +1 และแทน 0 ด้วย - 1) จากตัวอย่างตามรูปที่ A4 ลำดับ PRBS คือ +1,+1,+1,-1,+1,-1,-1 (ส่งชิปซ้ายสุดไปก่อน)



รูปที่ A4 หลักการพื้นฐานของการมอดูเลทรหัสด้วย PRBS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

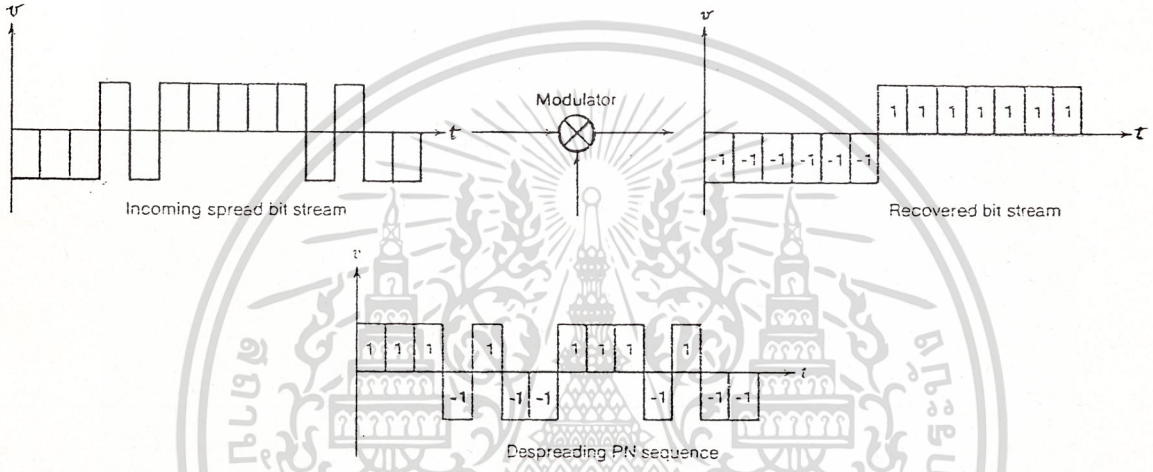
พิจารณาตามรูป A4 จะเห็นว่า บิทข้อมูลแต่ละบิทที่เข้ามาจะถูกคูณ (มอดูเลท) ด้วย PRBS ที่มีรูปแบบเหมือนกัน ถ้า PRBS นี้มีความยาว N (มีสมาชิก N ตัว) แล้ว ช่องสัญญาณที่ส่งออกไปจะใช้แบนด์วิดท์เท่ากับ $W = NR_b = NW_b$ และส่งชิปที่มอดูเลทแล้ว ด้วยอัตรา $R_c = NR_b$ ดังนั้นสเปคตรัมของบิทข้อมูลเดิมจะถูกแผ่กระจายออกมีแบนด์วิดท์กว้างขึ้น



รูปที่ A5 การดีสเปรดหรือลดแบนด์วิดท์ของ PRBS ลงเท่าเดิม โดยใช้แมทช์ฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านรับ เพื่อให้ได้ข้อมูลข่าวสารตามเดิม จำเป็นต้องมีการดีสเปรด โดยการใช้แมทช์ฟิลเตอร์ พิจารณารูป A5 จะเห็นว่า ชิปที่ถูกมอดูเลทเอาสัญญาณพาหะออกไปแล้วนั้น จะถูกป้อนเข้าไปในแมทช์ฟิลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยรีจิสเตอร์เลื่อน, วงจรเลื่อนเฟส ซึ่งถูกกำหนดรูปแบบการเลื่อนให้เหมือนกับรูปแบบของ PRBS และวงจรบวก สังเกตตามรูป A5 จะเห็นว่าเอาท์พุทของวงจรบวกจะเป็น +7 เมื่อบิทข้อมูลเดิมเป็น +1 และ -7 เมื่อบิทข้อมูลเดิมเป็น -7



รูปที่ A6 การดีสเปรด โดยใช้การคูณ

วิธีการดีสเปรดดังกล่าว มีลักษณะการทำงาน*เสมือนกับว่า* (จากรูป A6) สัญญาณที่เข้ามาถูกคูณด้วย ลำดับ PRBS ที่มีรูปแบบเดียวกับทางด้านส่ง ซึ่งทำให้ได้สเปคตรัมของสัญญาณเดิมกลับมามีแบนด์วิดท์เท่าเดิมคือ W_c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก B

เครื่องสร้างรูปแบบและเครื่องวิเคราะห์อัตราความผิดพลาดบิท

ในการทดสอบระบบ ไม่ว่าจะเป็นแบบทางเดียว หรือแบบวนกลับก็ตาม จะเป็นการส่งข้อมูลที่รู้ล่วงหน้าให้แก่ฝ่ายรับ เพื่อทำการตรวจสอบข้อมูลที่รู้ล่วงหน้าเหล่านั้น เครื่องมือนี้รู้จักกันดีในนามของ "เครื่องสร้างรูปแบบ" (Pattern generator) เครื่องนี้จะทำการส่งบิทข้อมูลเป็นบล็อก ๆ และมีรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. ส่งบิทสั้นๆหลายบิทซ้ำๆกัน
2. ส่งบิทยาว ๆ เช่น 1000 บิท ครั้งเดียว
3. ส่งบิทยาว ๆ ซ้ำ ๆ กัน
4. ส่งบิทในรูปของอักขระ หรือคำ หรือข้อความ ใด ๆ เช่น

   the quick brown for jumps over the lazy dog.

ฟังค์ชั่นของเครื่องวิเคราะห์อัตราความผิดพลาดบิท

เครื่องนี้ไม่เพียงแต่สามารถทดสอบอัตราความผิดพลาดบิทเพียงอย่างเดียว แต่ยังทำงานได้มากกว่านั้น เครื่องพวกนี้มีหลายรุ่นหลายแบบที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูล ในที่นี้ขอแสดงตัวอย่างเครื่องรุ่นหนึ่ง

เครื่องนี้ออกแบบมาใช้สำหรับ ระบบมาตรฐานการมัลติเพล็กซ์ T1 ซึ่งมีอัตราบิท 1.544 Mb/s ซึ่งการตรวจสอบระดับ T1 นี้ จำเป็นต้องใช้รูปแบบหลายรูปแบบดังนี้

1. สร้างรูปแบบเฟรมหลายๆชนิด ซึ่งสามารถต่อเข้ากับระบบ T1 ได้ มีรูปแบบเฟรมเหมือนกับที่ใช้ในระบบ T1
2. สร้างรูปแบบบิทหลาย ๆ ชนิดที่ประกอบด้วยบิท 0 และ บิท 1 สลับกัน โดยมีอัตราส่วนบิท 0 ต่อบิท 1 ที่แน่นอน
3. ใช้รหัสแบบ NRZ (Nonretern to zero) และ Bipolar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการแสดงผล

1. แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิท
2. ร้อยละของช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาด
3. ร้อยละของเฟรมที่ผิดพลาด
4. บอกการหลุดหายของสัญญาณ, บอกการซิงโครไนซ์ของเฟรม, การซิงโครไนซ์ของอักขระ

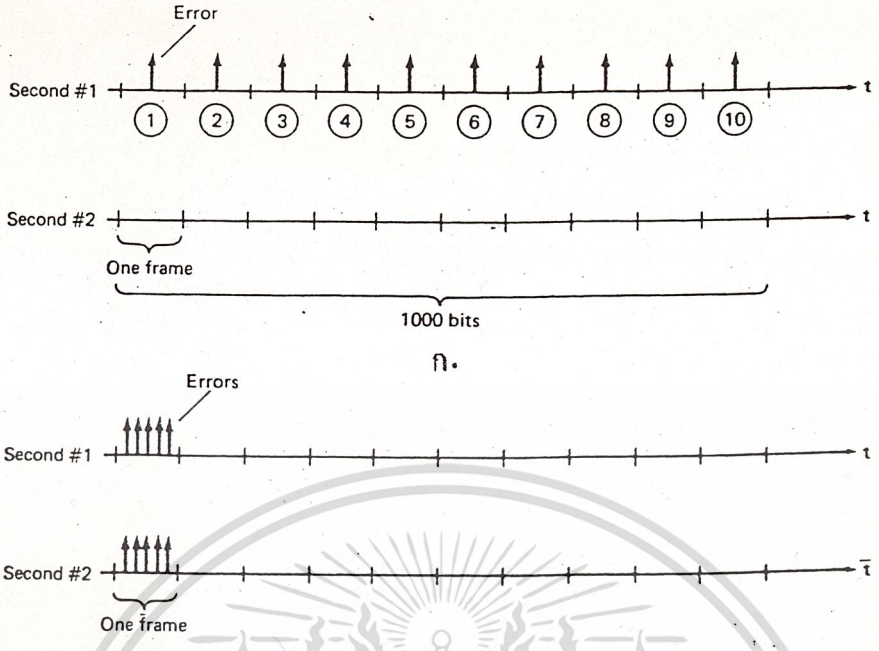
ความหมายของการวัดเหล่านี้แสดงดังรูป ก. สมมุติส่งข้อมูลด้วยอัตรา 1,000 bps. จะได้ 100 บิทเป็น 1 เฟรม ในวินาที #1 เกิดความผิดพลาด 1 บิทต่อทุก ๆ เฟรม ในวินาที #2 ทุก ๆ เฟรมปราศจากความผิดพลาดเพราะฉะนั้น อัตราความผิดพลาดบิทในช่วง 2 วินาทีแรกคือ 10/2000 =1/200 ,ร้อยละของเวลาที่เกิดความผิดพลาดคือ 50 (เกิดความผิดพลาด 1วินาที ไม่เกิดความผิดพลาด 1วินาที) ,ร้อยละของเฟรมที่ผิดพลาดคือ 50 (เกิดเฟรมผิดพลาด 10เฟรมใน 20เฟรม)

ต่อมาใช้จำนวนความผิดพลาดเท่าเดิม(ความผิดพลาด 10 บิท) แต่กระจายอยู่แต่ในเฉพาะเฟรมแรกของแต่ละวินาที ดังแสดงดังรูป ข. BER ยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 1/200 ร้อยละของเวลาที่เกิดความผิดพลาดคือ 100 (ทุกๆวินาทีเกิดความผิดพลาดเสมอ) , ร้อยละของเฟรมที่ผิดพลาดคือ 10(เกิดเฟรมผิดพลาด 2เฟรมใน 20เฟรม)

เหตุผลในการวัดค่าต่างๆเหล่านี้ เพื่อวิเคราะห์การกระจายของการผิดพลาดว่าเป็นอย่างไร เช่น ถ้าค่า BER และร้อยละของเฟรมที่ผิดพลาดมีค่าสูงและร้อยละของเวลาที่ผิดพลาด มีค่าต่ำแสดงว่า ความผิดพลาดมีการกระจายอย่างสุ่ม ระหว่างที่ผ่านสายส่ง และอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณรบกวนหลาย ๆ ชนิด หรือเกิดจากอุปกรณ์อิเลกทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามถ้าค่า BER มีค่าสูง แต่ร้อยละของเฟรมที่ผิดพลาดและร้อยละของเวลาที่ผิดพลาดมีค่าต่ำ แสดงว่าความผิดพลาดเกิดจาก สัญญาณรบกวนอิมพัลซ์ ซึ่งเกิดขึ้นไม่บ่อย แต่ถ้าเกิดขึ้นแล้ว จะมีผลอย่างมากหรืออาจจะเกิดเนื่องมาจาก ปัญหาการซิงโครไนซ์ก็ได้

การแยกความแตกต่างเหล่านี้ จะช่วยทำให้วิศวกรสามารถแยกปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ค่า BER ที่เป็นที่ยอมรับกันมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-5} ถึง 10^{-12}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ B1 แสดงการวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบต่างๆ ก. ความผิดพลาดกระจายอยู่ในทุกเฟรมของวินาทีที่ 1 ข. จำนวนความผิดพลาดเท่าเดิม แต่อยู่เฉพาะในเฟรมแรก ของวินาทีที่ 1 และ 2 เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

มาตราฐานความยาวของลำดับสุ่มเทียม (PRBS) ที่กำหนดโดย CCITT แสดงดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ C1 ความยาวลำดับสุ่มเทียมที่ CCITT กำหนด สำหรับใช้วัดอัตราความผิดพลาดเมื่อระบบสื่อสารมีอัตราบิทใช้งานต่าง ๆ กัน

Applicable Bit Rates	*Pattern Length*	*CCITT Recommendation [1, 2]*
Up to 20 kb/s	$2^9 - 1$	V.52
20 to 72 kb/s	$2^{20} - 1$	V.57
1.544 Mb/s	$2^{15} - 1$	O.151
2.048 Mb/s	$2^{15} - 1$	O.151
6.312 Mb/s	$2^{15} - 1$	O.151
8.448 Mb/s	$2^{15} - 1$	O.151
32.064 Mb/s	$2^{15} - 1$	O.151
34.368 Mb/s	$2^{23} - 1$	O.151
44.736 Mb/s	$2^{15} - 1$	O.151
139.264 Mb/s	$2^{23} - 1$	O.151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ไม่อาจสำเร็จเสร็จสิ้นลงได้ หากปราศจากผู้มีพระคุณ ดังต่อไปนี้

- คำปรึกษา และ คำแนะนำต่างๆที่จำเป็นอย่างมาก จาก อาจารย์ กอบชัย เดชหาญ
- คำปรึกษาด้านวิชาการ จาก อ.ณรงค์ เหมกรณ์ อ.สมยศ จุณณะปิยะ อ.ถวิล กิ่งทอง และ อ.ทองทด วานิชศรี
- คำแนะนำต่างๆในการทำงาน จาก เพื่อนๆภาคโทรคมนาคม รุ่น 26
- ขอขอบคุณพิเศษสำหรับ คุณ ศศิวิมล ประทุมราช ผู้พิมพ์ปริญญานิพนธ์เล่มนี้

ผู้จัดทำหวังว่า ปริญญานิพนธ์เล่มนี้คงเป็นประโยชน์ ต่อ ผู้สนใจบ้างตามสมควร หากพบข้อบกพร่องประการใด โปรดช่วยคิดแก้ไขเพื่อพัฒนาความรู้ให้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง.

1. E. A. Newcomb, S. Pasupatha., "Error Rate Monitoring For Digital Communication", Proceeding of IEEE, Vol.70, No.8, August 1982, P.805-828.

2. B. Han, "Analysis of a Modified Data Test Set By Use of Generating Functions", IEEE Transaction on Communication, October 1974, P.1706-1710.

3. D. R. Smith, "Digital Transmission System", Van Nostrand Renihold Company Inc., p.494, 1985.

4. L. Nashelsky, "Introduction to Digital Technology", Great Neck, New York.

5. W. Tomasi, "Advance Electronic Communications System" Prentice-Hall Inc., 1987.

6. S. W. Golomb, "Shift Register Sequences", Holden-Day, Inc., 1967.

7. W. L. Schweber, "Data Communication", McGraw-Hill book company, First Printing, 1988.

8. R. E. Ziemer, R. L. Peterson, "Digital Communication and Sprade Spectrum System", McGraw-Hill book company.

9. T. Pratt, C. W. Bostain, "Satellite Communications", John Wiley & Son Inc., 1986.

10. D. Roddy, "Satellite communications", Prentice hall Inc., 1989

11. F. J. Macwilliam, N. J. A. Sloane, "Pseudo-Random Sequences and Arrays", Proc. IEEE, vol.64, pp. 1715-1721, 1976.

12. บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, สุวัตร์ มณีตานนท์, "การออกแบบและสร้างเครื่องวัดอัตราการผิดพลาดของการรับส่งข้อมูล", การประชุมทางวิชาการ วิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่๕

13. เฉลิมพล น้ำค้าง, "หลักดิจิตอลและการใช้งาน ", ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 1987.

14. "คู่มือ/เทียบเบอร์ ไอซี TTL ", บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.

15. ประเสริฐ โรจน์สุธีวัฒน์, "เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับ Spread spectrum communication ระบบสื่อสารสมบูรณ์แบบ ", วารสารเซมิคอนดักเตอร์และอิเล็คทรอนิกส์, เล่มที่ 83, ธันวาคม 30 - มกราคม 31.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้