





หัวข้อปริญญาานิพนธ์

Low bitrate data transmission  
in AM broadcasting system

จัดทำโดย

นาย มন্ত্রী อุบลรัตน์ 35103152

นาย มนต์ชัย เกตุสุข 35103153

นาย สมเกียรติ ไชยจำ 35103158

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์กฤตากร กล่อมการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์

ประธานกรรมการ

( )

กรรมการ

( )

กรรมการ

( )

กรรมการ

( )

กรรมการ

( )

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การส่งข้อมูลด้วยความเร็วต่ำในระบบกระจายเสียง AM  
Low bitrate data transmission in AM  
broadcasting system

ผู้ร่วมงาน

นาย มนตรี กุบลรัตน์ 35103152

นาย มนต์ชัย เกตุสุข 35103153

นาย สมเกียรติ ไทยจำ 35103158

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์กฤตากร กล่อมการ

ปีการศึกษา 2537

## บทคัดย่อ

การรับส่งข้อมูลดิจิทัล ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนความถี่สัญญาณตามข้อมูล (FSK) มีข้อจำกัดของอัตราการส่งข้อมูลที่แบนด์วิคท์ของช่องสัญญาณ โครงการนี้เสนอการรับส่งข้อมูลดิจิทัลที่อยู่ในรูปของรหัส ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนความถี่สัญญาณตามข้อมูลให้มีผลต่างระหว่างความถี่น้อยที่สุด (MSK) เพื่อเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลเป็น 2 เท่า โดยที่แบนด์วิคท์ยังเท่าเดิม

ปริิญาญานี้พหณ์ฉบับนี้ แบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรกเป็นทฤษฎีที่ใช้ในโครงการนี้ประกอบด้วย Walsh function, Orthogonal function, MSK (minimum shift keying) ในส่วนที่สองเป็นการทำงานของวงจร, ผลการทดลอง, ปัญหาและแนวทางแก้ไข

## ABSTRACT

The digital data Transmission by using The Technical of Frequency Shift Keying (FSK), that have the Limitation of transmission rate that involved with bandwidth of channal .

The project show on the digital data transmission and receiving with in the from of code by using The technical of Minimum Shift Keying (MSK), which can transmission data at twice the rate attainable by FSK in a given bandwidth .

This Thesis have two parts, The frist part in the Theory include with Walsh function, orthogonal function and MSK, The second part is the practical part .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

## บทที่ 1

บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2

## บทที่ 2

2.1 วอลซ์ฟังก์ชัน (Walsh function).....	4
2.2 ออร์ธอนอร์มอลฟังก์ชัน (Orthonormal function).....	12
2.3 MSK (Minimum Shift Keying).....	16
2.4 ไอซีตระกูล GAL (Generic Array Logic).....	29
2.5 คุณสมบัติของรหัสที่ใช้ส่ง.....	33

## บทที่ 3

{การทำงานของวงจร}	
ภาคส่ง.....	35
- วงจร วอลซ์ฟังก์ชัน.....	38
- วงจร เข้ารหัส.....	40
ภาครับ.....	42
หลักการทํางานภาครับ.....	42
วงจรถอดรหัส.....	43

## บทที่ 4

ผลการทดลอง.....	48
สรุป.....	51

## ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

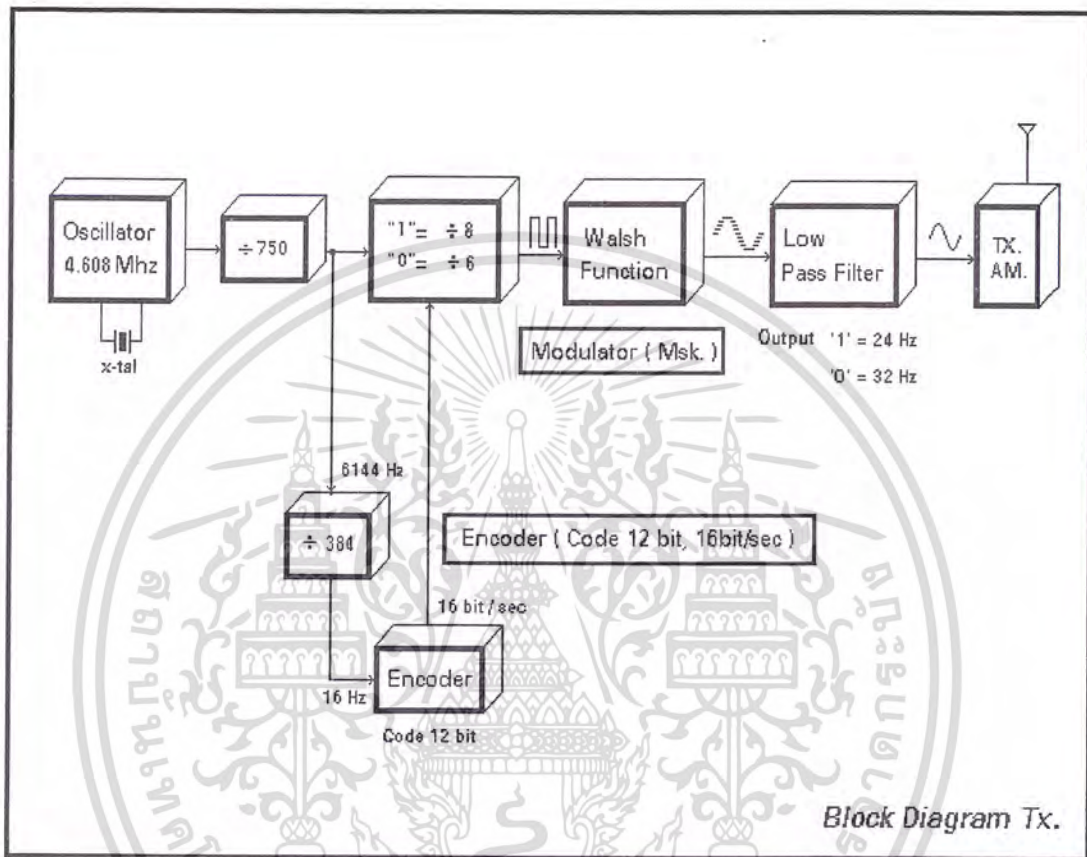
หนังสืออ้างอิง

## บทที่ 1

### บทนำ

โครงการนี้เป็นการศึกษาถึงการส่งข้อมูลที่อยู่ในรูปของรหัสด้วยอัตราเร็วในการส่งข้อมูลต่ำ โดยสิ้นเปลืองแบนด์วิคท์น้อย ซึ่งจะแปลงข้อมูลดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก โดยใช้วิธีการมอดูเลทแบบ MSK (Minimum Shift Keying) ซึ่งจะใช้ระดับของสัญญาณดิจิทัลไปควบคุมความถี่ของสัญญาณที่จะส่งออกจากวงจรมอดูเลท เช่นเดียวกับการมอดูเลทแบบ FSK (Frequency Shift Keying) แต่จะเลือกใช้ความถี่ที่ทำให้ผลต่างระหว่างความถี่ทั้งสองตัวมีค่าน้อยที่สุด คือเท่าครึ่งหนึ่งของอัตราเร็วในการส่งข้อมูล จึงเป็นการใช้แบนด์วิคท์อย่างมีประสิทธิภาพ คือเมื่อใช้แบนด์วิคท์เท่ากัน การมอดูเลทแบบ MSK สามารถที่จะเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูลให้เป็นสองเท่าของการมอดูเลทแบบ FSK และอัตราเร็วในการส่งข้อมูลจะไม่ขึ้นอยู่กับค่า Q ของวงจรผ่านแถบความถี่ที่ภาครับ เพราะภาครับไม่ต้องปรับวงจรผ่านแถบความถี่ นอกจากนี้ยังมีจุดเด่นอีกข้อ คือเฟสของสัญญาณ MSK จะต่อเนื่องกันตลอด จึงสามารถลด Side lobe ที่จะรบกวนช่องสัญญาณข้างเคียง ดังนั้นการมอดูเลทแบบ MSK จึงเหมาะกับช่องสัญญาณที่มีแบนด์วิคท์แคบ

โครงการนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือภาคส่งและภาครับ

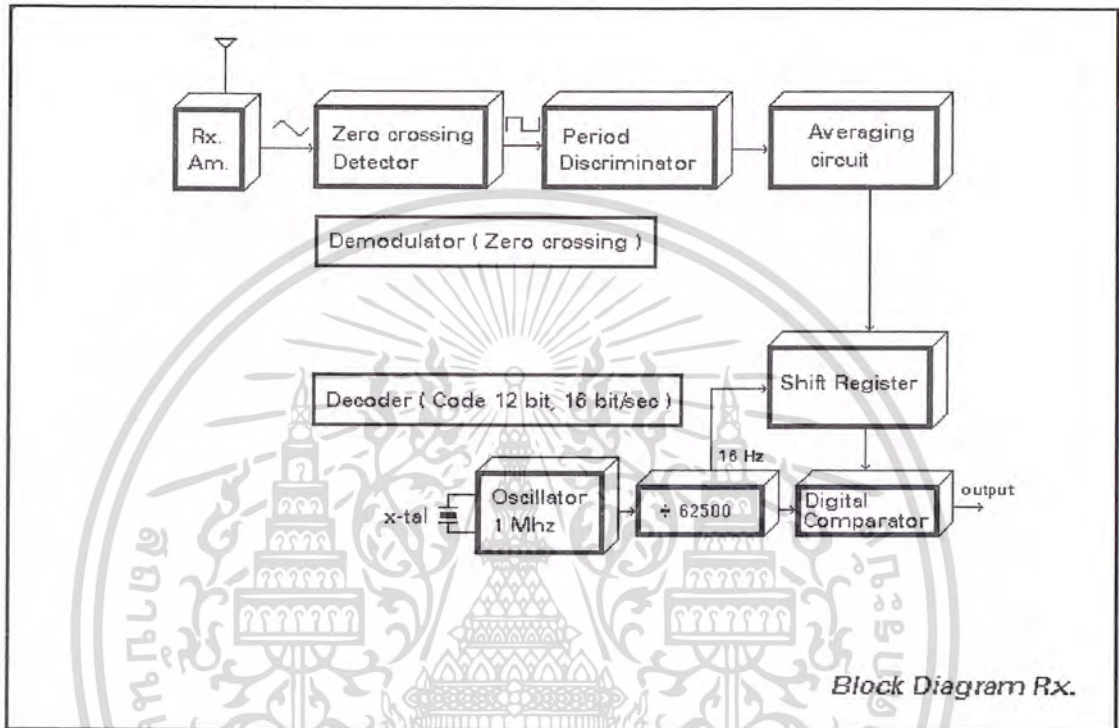


ผังแสดงการทำงานของวงจร ทางด้านส่ง

ภาคส่งประกอบด้วย

- ชุด Modulator ซึ่งจะเป็นการ Modulation แบบ Minimum shift keying (MSK.) ส่วนในรายละเอียดของ MSK. นั้นได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว
  - ชุดของวงจรเข้ารหัส (Encoder) รหัสนี้จะเป็นรหัส จำนวน ๑๒ บิต โดยความเร็วในการส่งรหัสจะเท่ากับ ๑๖ บิตต่อวินาทีรายละเอียดของการกำหนดรหัสนั้นได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว
- ฉะนั้นจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของวงจรแต่ละชุดว่าทำงานกันอย่างไรทำไมจึงต้องให้ทำงานเช่นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผังแสดงวงจรทางด้านรับ

ภาครับประกอบด้วย

- Demod โดยใช้เทคนิค Zero crossing คือนับจุดตัดศูนย์ของวงจร
- วงจรถอดรหัส (Decode) จะทำการถอดรหัสว่าได้รับถูกต้องหรือไม่หากรหัสถูกก็จะแสดงผล

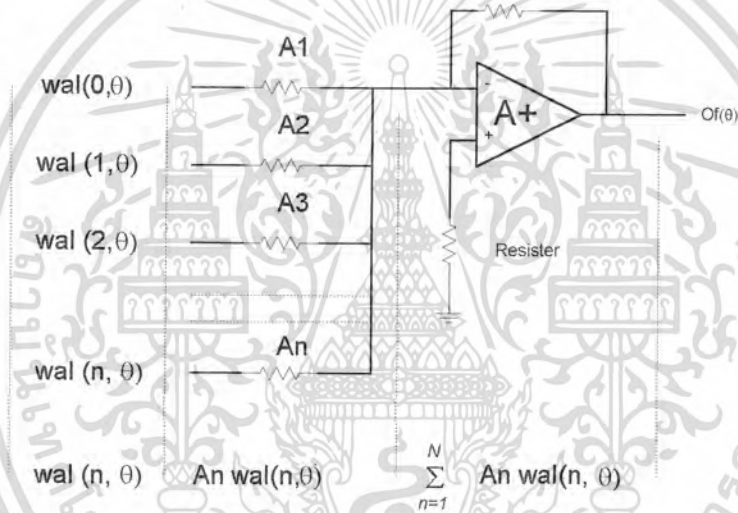
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

2.1 วอลฟังก์ชัน (Walsh function)

Walsh function เรียกได้ว่าเป็น Digital Fourier series คือใช้เทคนิคของ Fourier series ในการกระจายฟังก์ชันรายคาบใดๆ ให้อยู่ในรูปของอนุกรม square wave ซึ่งเราจะเรียก square wave แต่ละตัวที่ได้ว่าเป็น Walsh function

ดังนั้น ในทางปฏิบัติเราสามารถสร้างสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันรายคาบใดๆ ได้จาก Walsh function ที่เป็นส่วนประกอบของฟังก์ชันนั้น โดยใช้ค่าความต้านทานในการ Weighting แทนค่าสัมประสิทธิ์ของ Walsh function แต่ละตัวแล้วนำไปรวมกัน ดังรูป



รูปที่ 3 แสดงการสร้างสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันรายคาบจาก Walsh function

โดยที่  $f(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{Wal}(n, \theta) ; 0 \leq \theta \leq 1$  (1)

เมื่อ  $\theta = t/T ; T$  เป็นเวลา 1 Period ของ  $f(\theta)$

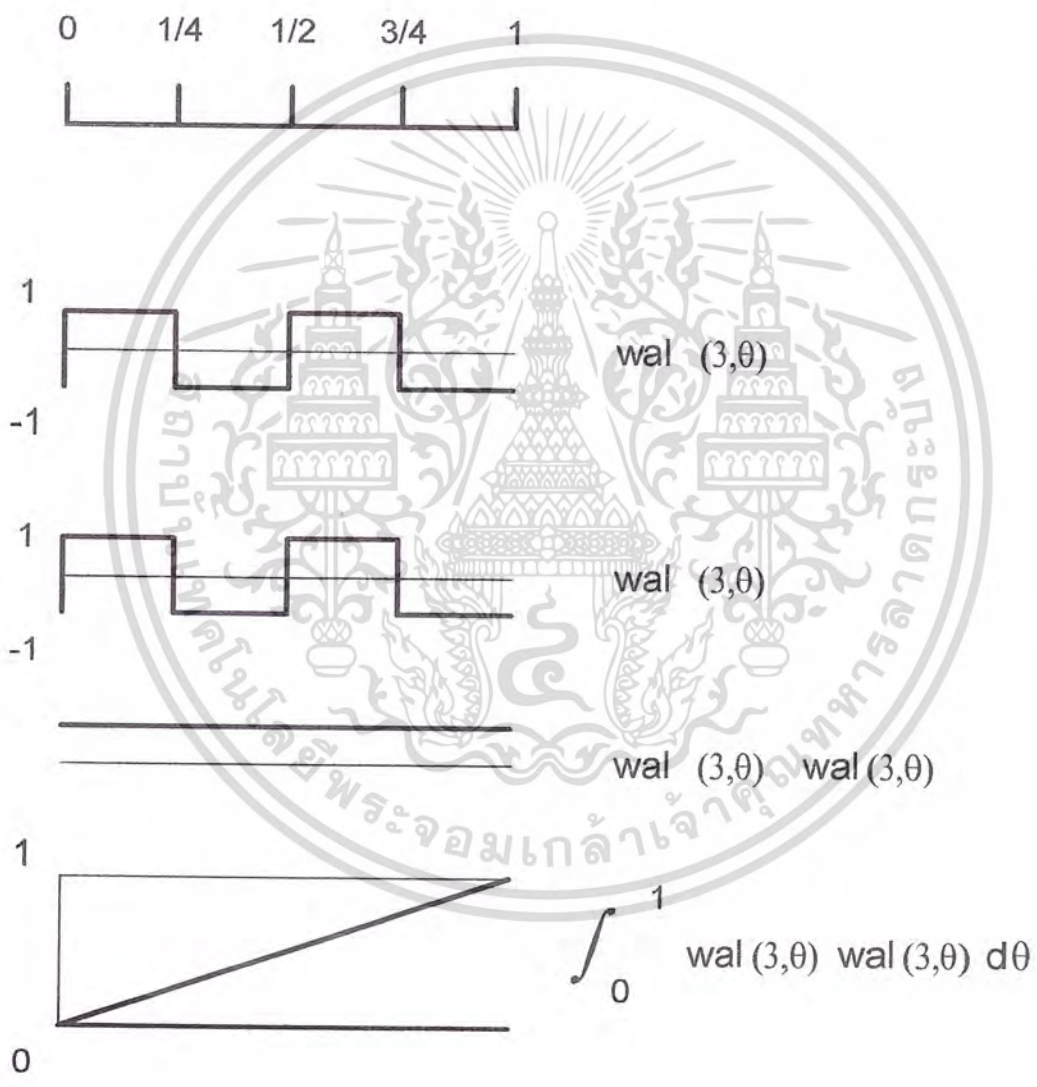
$A_0$  เป็นสัมประสิทธิ์ทาง DC

$A_n$  เป็นสัมประสิทธิ์ของ Walsh function order ที่  $n$

สัมประสิทธิ์  $A_0$  และ  $A_n$  สามารถหาค่าได้โดยใช้คุณสมบัติของ Orthonormal เนื่องจาก Walsh functions เป็นเซตของ Orthonormal function ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

$$\int_0^1 \text{Wal}(n, \theta) \text{Wal}(m, \theta) d\theta = \begin{cases} 1 ; n = m \\ 0 ; n \neq m \end{cases} \quad (2)$$

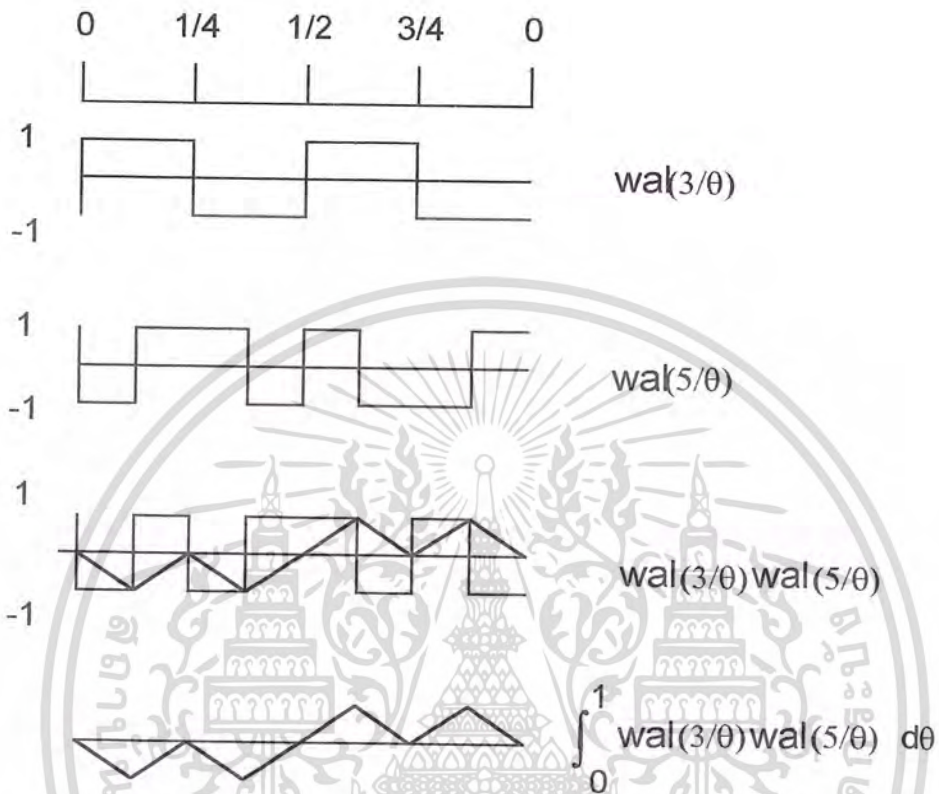
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงคุณสมบัติการ Orthonormal เมื่อ  $n=m$

$$\int_0^1 Wal(3, \theta) Wal(3, \theta) = 1 ; 0 \leq \theta \leq 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แสดงคุณสมบัติการ Orthonormal เมื่อ  $n \neq m$

$$\int_0^1 \text{Wal}(3, \theta) \text{Wal}(5, \theta) d\theta = 0 ; 0 \leq \theta \leq 1$$

เราจะใช้คุณสมบัติ Orthonormal ในการหาค่าสัมประสิทธิ์  $A_0$  และ  $A_n$  ดังนี้จากสมการ

(1)

$$f(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{Wal}(n, \theta) ; 0 \leq \theta \leq 1$$

$$f(\theta) \text{Wal}(0, \theta) = A_0 \text{Wal}(0, \theta) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{Wal}(n, \theta) \text{Wal}(0, \theta)$$

$$\int_0^1 f(\theta) \text{Wal}(0, \theta) d\theta = \int_0^1 A_0 \text{Wal}(0, \theta) d\theta + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \int_0^1 \text{Wal}(n, \theta) \text{Wal}(0, \theta) d\theta$$

เนื่องจากคุณสมบัติของ Orthonormal เทอมอื่นๆ จะมีค่าเป็นศูนย์ยกเว้น

$$A_0 = \int_0^1 f(\theta) d\theta ; \text{Wal}(0, \theta) = 1 \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกันสัมประสิทธิ์  $A_n$  หาได้จากสมการ (1) ดังนี้

$$\begin{aligned} f(\theta) \cdot \text{Wal}(n, \theta) &= A_0 \text{Wal}(n, \theta) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{Wal}(n, \theta) \cdot \text{Wal}(n, \theta) \\ \int_0^1 f(\theta) \text{Wal}(n, \theta) d\theta &= \int_0^1 A_0 \text{Wal}(n, \theta) d\theta + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^1 A_n \text{Wal}(n, \theta) \text{Wal}(n, \theta) d\theta \\ A_n &= \int_0^1 f(\theta) \text{Wal}(n, \theta) d\theta \end{aligned} \quad (4)$$

Walsh function ประกอบด้วย Rademacher function  $[R(\theta)]$  หลายตัว EXCLUSIVE OR กันโดย

$$\text{Wal}(n, \theta) = \pi_{i=1}^n g_i R_i(\theta) \quad (5)$$

เมื่อ  $n$  เป็น Order ของ Walsh function

$g$  เป็น gray code ของเลข binary  $n$

$R(\theta)$  เป็น Rademacher function

ตัวอย่างเช่น  $\text{Wal}(13, \theta)$  สามารถสร้างได้ดังนี้

1. แปลงเลข 13 เป็น binary
2. แปลง binary ของเลข 13 เป็น gray code

$$13 = 1101_2 = 1011_g$$

$$\text{Wal}(13, \theta) = R_4(\theta) \oplus R_2(\theta) \oplus R_1(\theta)$$

Rademacher function :  $R_i(\theta)$  นิยามโดย

$$R_i(\theta) = \text{sgn} [\text{Sin}(2^i \pi \theta)] \quad (6)$$

$$\text{sgn } x = \begin{cases} +1 & ; x \geq 0 \\ -1 & ; x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

โดย  $i$  เป็นบิตที่  $i$  ของ gray code

$\text{sgn}$  เป็น Signum function ใช้ Normalized ให้  $R_i(\theta)$  เป็น Orthonormal

function จากนิยามของ Rademacher function จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนเครื่องหมาย (จุดตัดศูนย์) เท่ากับ  $2^i$  ครั้งในช่วงเวลา 1 period

สรุปแล้ว Rademacher function คือ สัญญาณนาฬิกา ซึ่งมีขนาด +1 และ -1 มีความถี่เป็น  $2^{i-1}$  ของสัญญาณ  $f(\theta)$  คือ

$R_1(\theta)$  มีความถี่เท่ากับ  $f(\theta)$

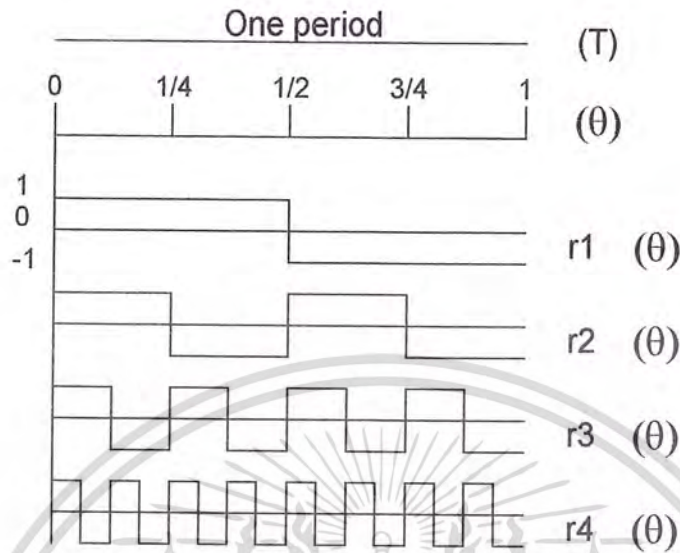
$R_2(\theta)$  มีความถี่เป็น 2 เท่าของ  $f(\theta)$

$R_3(\theta)$  มีความถี่เป็น 4 เท่าของ  $f(\theta)$

$R_4(\theta)$  มีความถี่เป็น 8 เท่าของ  $f(\theta)$  แสดงในรูปที่ 6. ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



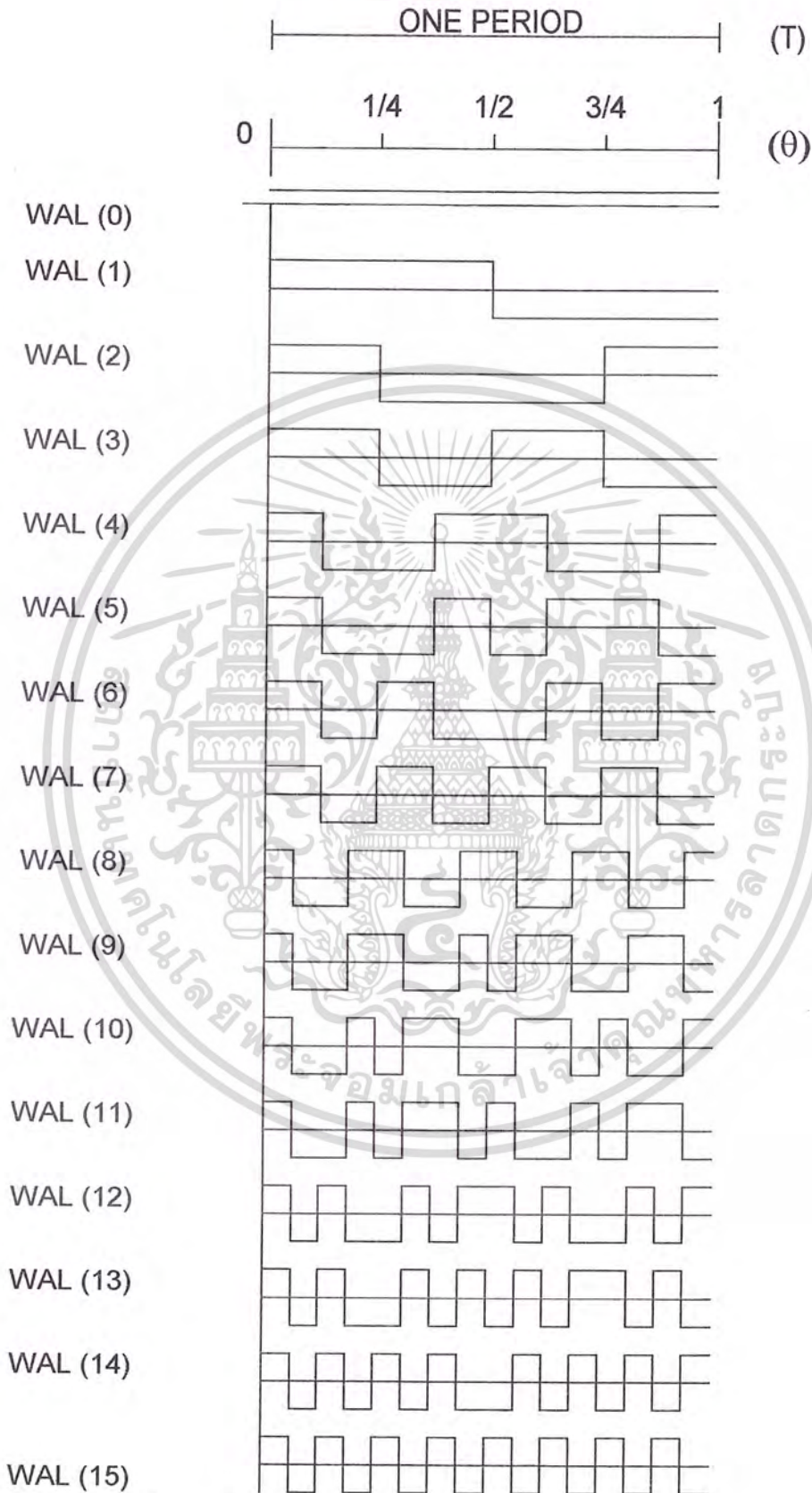
รูปที่ 6 Rademacher function อันดับ 1 ถึง 4

Walsh function ที่ generate ได้จาก  $R_1(\theta)$  ถึง  $R_4(\theta)$  ในรูปที่ 6 ก็คือ Wal(0) ถึง

Wal15

$$\begin{aligned}
 \text{Wal}(0) &= 1 \\
 \text{Wal}(1) &= R_1 \\
 \text{Wal}(2) &= R_2 \oplus R_1 \\
 \text{Wal}(3) &= R_2 \\
 \text{Wal}(4) &= R_3 \oplus R_2 \\
 \text{Wal}(5) &= R_3 \oplus R_2 \oplus R_1 \\
 \text{Wal}(6) &= R_3 \oplus R_1 \\
 \text{Wal}(7) &= R_3 \\
 \text{Wal}(8) &= R_4 \oplus R_3 \\
 \text{Wal}(9) &= R_4 \oplus R_3 \oplus R_1 \\
 \text{Wal}(10) &= R_4 \oplus R_3 \oplus R_2 \oplus R_1 \\
 \text{Wal}(11) &= R_4 \oplus R_3 \oplus R_2 \\
 \text{Wal}(12) &= R_4 \oplus R_2 \\
 \text{Wal}(13) &= R_4 \oplus R_2 \oplus R_1 \\
 \text{Wal}(14) &= R_4 \oplus R_1 \\
 \text{Wal}(15) &= R_4
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แสดง Walsh function จาก Wal(0) ถึง Wal(15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีผลสืบเนื่อง

การสร้างสัญญาณ Sinewave จาก Walsh function เราต้องการสร้างสัญญาณ Sinewave ดังนั้นกำหนดให้

$$f(t) = \sin 2\pi t$$

$$f(\theta) = \sin 2\pi\theta ; \theta = t/T$$

และ  $\theta$  มีค่าในช่วง  $0 \leq \theta \leq 1$

หากเราต้องการค่าที่ละเอียดใกล้เคียงค่าจริงมากเท่าใด ทำได้โดยการเพิ่ม Order ของ Walsh function ที่ใช้ ในกรณีนี้จะใช้ Wal(1) ถึง Wal(31)

การหาค่า Walsh function ที่เป็นส่วนประกอบของ  $\sin 2\pi\theta$  ทำได้โดยพิจารณา  $\sin 2\pi\theta$  เมื่อ  $0 \leq \theta \leq 1$  จะได้ผลดังนี้ คือ

$\theta$	ช่วง	ฟังก์ชัน
1/2	$0 \leq \theta \leq 1$	เป็นฟังก์ชันคี่
1/4	$0 \leq \theta \leq 1/2$	เป็นฟังก์ชันคู่
3/4	$1/2 < \theta < 1$	เป็นฟังก์ชันคี่

Walsh function ที่เป็นส่วนประกอบของ  $\sin 2\pi\theta$  จะมีคุณสมบัติเหมือนกับ  $\sin 2\pi\theta$  ดังในตารางจะได้ Walsh function ที่เป็นส่วนประกอบคือ Wal(1,  $\theta$ ), Wal(5,  $\theta$ ), Wal(9,  $\theta$ ), Wal(13,  $\theta$ ), Wal(17,  $\theta$ ), Wal(21,  $\theta$ ), Wal(25,  $\theta$ ) และ Wal(29,  $\theta$ )

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Walsh function สามารถหาได้จากสมการที่(4) ดังนี้

$$A_n = \int_0^1 f(\theta) \text{Wal}(n, \theta) d\theta$$

$$= \int_0^1 \sin 2\pi\theta \cdot \text{Wal}(n, \theta) d\theta$$

$$A_1 = 4 \int_0^{1/4} \sin 2\pi\theta d\theta - 4 \int_{1/4}^{1/2} \sin 2\pi\theta d\theta = -2/\pi [\cos \pi/2 - 1]$$

$$= 2/\pi$$

$$= 0.636619772$$

$$A_5 = 4 \left[ \int_0^{1/8} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{1/8}^{1/4} \sin 2\pi\theta d\theta \right]$$

$$= -0.263$$

$$A_9 = 4 \left[ \int_0^{2/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{2/32}^{6/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{6/32}^{8/32} \sin 2\pi\theta d\theta \right]$$

$$= -0.0524$$

$$A_{13} = 4 \left[ \int_0^{1/16} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{1/16}^{2/16} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{2/16}^{3/16} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{3/16}^{4/16} \sin 2\pi\theta d\theta \right]$$

$$= -0.1266315$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{17} = 4 \left[ \int_0^{1/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{1/32}^{3/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{3/32}^{5/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{5/32}^{7/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{7/32}^{8/32} \sin 2\pi\theta d\theta \right]$$

$$= -0.012472118$$

$$A_{21} = 4 \left[ \int_0^{1/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{1/32}^{3/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{3/32}^{4/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{4/32}^{5/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{5/32}^{7/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{7/32}^{8/32} \sin 2\pi\theta d\theta \right]$$

$$= +0.00516612$$

$$A_{25} = 4 \left[ \int_0^{1/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{1/32}^{2/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{2/32}^{3/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{3/32}^{4/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{4/32}^{5/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{5/32}^{6/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{6/32}^{7/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{7/32}^{8/32} \sin 2\pi\theta d\theta \right]$$

$$= -0.02595$$

$$A_{29} = 4 \left[ \int_0^{1/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{1/32}^{2/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{2/32}^{3/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{3/32}^{4/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{4/32}^{5/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{5/32}^{6/32} \sin 2\pi\theta d\theta + \int_{6/32}^{7/32} \sin 2\pi\theta d\theta - \int_{7/32}^{8/32} \sin 2\pi\theta d\theta \right]$$

$$= -0.062701$$

ตาราง 1 แสดงการสร้างสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันรายคาบจาก Walsh Function

Walsh (n,θ) ที่ต้องการ Generate	Sign	Weiggtirg Fesistance (Ω) $1/A \times 0.1 \times 10^5$	Rademacher
1	+	$0.1570796328 \times 10^5$	R1
5	-	$0.038022813369 \times 10^5$	R1 ⊕ R2 ⊕ R3
9	-	$0.1908396947 \times 10^6$	R1 ⊕ R3 ⊕ R4
13	-	$0.0789692641 \times 10^6$	R1 ⊕ R2 ⊕ R4
17	-	$0.8017884372 \times 10^6$	R1 ⊕ R4 ⊕ R5
21	+	$1.935688679 \times 10^6$	R1 ⊕ R2 ⊕ R3 ⊕ R4 ⊕ R5
25	-	$0.3850323747 \times 10^6$	R1 ⊕ R3 ⊕ R5
29	-	$0.1594856295 \times 10^6$	R1 ⊕ R2 ⊕ R5

+ Normal

เอกสารนี้ Inverted ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 Orthogonal Function

Orthogonal function เป็นฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติพิเศษในการสุ่มหาย คือ อินทิเกรตของผลคูณของคู่ฟังก์ชันใดๆ ภายในเซตของ Orthogonal จะเป็นศูนย์ยกเว้นอินทิเกรตของผลคูณของตัวเอง นั่นเอง คือ

$$\int_0^T \phi_i(t) \phi_j(t) dt = \begin{cases} K & ; i=j \\ 0 & ; i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

ดังนั้นกล่าวได้ว่า  $\phi_1(t)$  และ  $\phi_j(t)$  เป็น Orthogonal Function และเรียกเซตของฟังก์ชัน  $\phi_1(t), \dots, \phi_n(t)$  ว่าเป็นเซตของ Orthogonal  $\{\phi_j(t)\}; j = 1, 2, \dots, N$  หากเราทำการ Normalize ฟังก์ชัน  $\phi_i(t)$  และ  $\phi_j(t)$  ให้ได้ผลของอินทิกรัลเป็นคือ

$$\int_0^T \phi_i(t) d\phi_j(t) dt = \begin{cases} 1 & ; i=j \\ 0 & ; i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

เราจะเรียก  $\{\phi_j(t)\}$  ว่าเป็นเซตของ Orthonormal function

เราสามารถได้ประโยชน์จากคุณสมบัติของ Orthogonal ในการ detect สัญญาณ

เพราะ

หากเรากำหนดให้สัญญาณ  $S_i(t)$  ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้แทนข่าวสารแต่ละ Message Point ให้ Orthogonal กัน ในการ detect สัญญาณ  $S_i(t)$  แต่ละตัวจะไม่รบกวนกัน เนื่องจากอินทิกรัลของผลคูณของสัญญาณ  $S_i(t)$  ที่ต่างกันจะมีค่าเป็นศูนย์

สัญญาณ  $S_i(t)$  สามารถกระจายให้อยู่ในรูปอนุกรมของ Orthonormal function ดัง

นี้

$$0 \leq t \leq T$$

$$S_i(t) = \sum_{j=1}^n S_{ij} \phi_j(t); \quad (3)$$

$$i=1, 2, \dots, M$$

เมื่อ  $S_i(t)$  เป็นสัญญาณข่าวสารแต่ละ Message Point

$S_{ij}$  เป็นสัมประสิทธิ์ของ Orthonormal function แต่ละตัวและค่าสัมประสิทธิ์ของ

Orthonormal function แต่ละตัวหาได้จาก

$$S_{ij} = \int_0^T S_i(t) \phi_j(t) dt \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Orthonormal function ใดๆ หาค่าได้โดย

$$\phi_i(t) = g_i(t) / \sqrt{\int_0^T g_i^2(t) dt} \quad (5)$$

เมื่อ  $g_i(t)$  เป็นฟังก์ชันที่กำหนดขึ้นใหม่เพื่อช่วยในการหาค่า  $\phi_i(t)$

$$g_i(t) = s_i(t) - \sum_{j=1}^{i-1} s_{ij} \phi_j(t) ; j=1, 2, \dots, i-1 \quad (6)$$

เช่น

$$\phi_1(t) = s_1(t) / \sqrt{E_1}$$

$$g_2(t) = s_2(t) - s_{21} \phi_1(t)$$

$$\phi_2(t) = g_2(t) / \sqrt{\int_0^T g_2^2(t) dt}$$

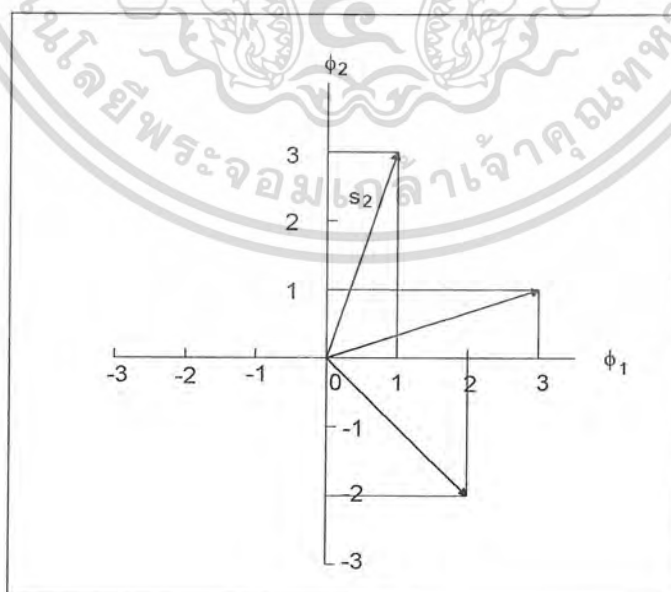
เมื่อพลังงานของสัญญาณ  $s_i(t)$  มีค่าเท่ากับ

$$E_i = \int_0^T s_i^2(t) dt \quad (7)$$

ดังนั้นพลังงานของ  $g_i(t)$  มีค่าเท่ากับ

$$E[g_i(t)] = \int_0^T g_i^2(t) dt \quad (8)$$

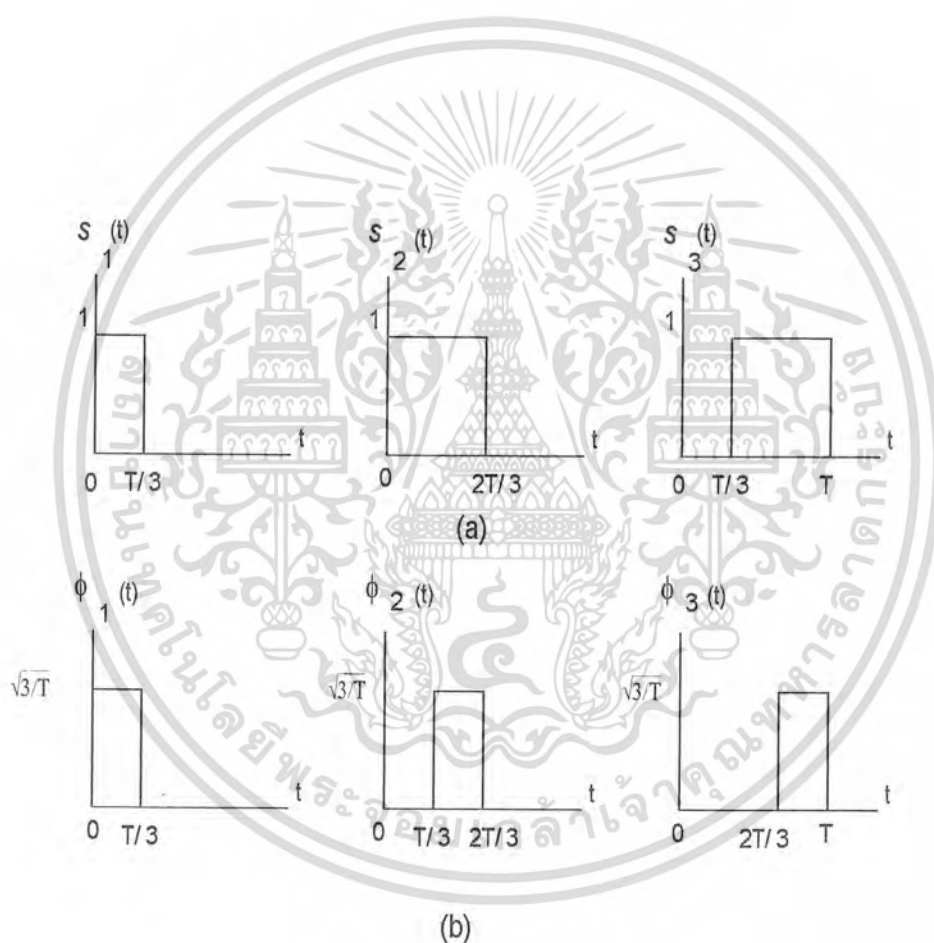
จากสมการที่ (5) เมื่อ  $\phi_i(t) = g_i(t) / \sqrt{\int_0^T g_i^2(t) dt}$  ดังนั้นสรุปได้ว่า Orthonormal function ใดๆ สามารถหาค่าได้จากสัญญาณ  $g_i(t)$  ทหารด้วยรากที่สองของพลังงานของตัวเอง



รูปที่ 8 แสดงสัญญาณ  $s_i$  เมื่อ  $N = 2$  และ  $M = 3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 8 แสดงถึงสัญญาณ  $S_1(t)$  ที่มี 3 Message Point คือ  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  ซึ่งสัญญาณทั้งสามประกอบขึ้นด้วย Orthonormal function สองตัวคือ  $\phi_1$  และ  $\phi_2$



รูปที่ 9

(a) แสดงถึงเซตของสัญญาณ  $S_1(t)$

(b) แสดง Orthonormal function ที่เป็นส่วนประกอบของ  $S_1(t)$

เพื่อความเข้าใจถึงวิธีการหา Orthonormal function ที่เป็นส่วนประกอบของสัญญาณ  $S_1(t)$  พิจารณารูปที่ 9 (a) ซึ่งมีสัญญาณ  $S_1(t), S_2(t), S_3(t)$  สามารถหาค่า Orthonormal function แต่ละตัวได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นแรกหาพลังงานของสัญญาณ  $s_1(t)$

$$\begin{aligned} E_1 &= \int_0^T s_1^2(t) dt \\ &= \int_0^{T/3} (1)^2 dt \\ &= T/3 \end{aligned}$$

หาค่า  $\phi_1(t)$  จากสมการที่ (5)

$$\begin{aligned} \phi_1(t) &= s_1(t) / \sqrt{E_1} \\ &= \begin{cases} \sqrt{3/T} & ; 0 \leq t \leq T/3 \\ 0 & ; \text{ค่าเวลาอื่นๆ} \end{cases} \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์  $s_{21}$  จากสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} s_{21} &= \int_0^T s_2(t) \phi_1(t) dt \\ &= \int_0^{T/3} (1) (\sqrt{3/T}) dt \\ &= \sqrt{T/3} \end{aligned}$$

และพลังงานสัญญาณ  $s_2(t)$  หาได้โดย

$$\begin{aligned} E_2 &= \int_0^T s_2^2(t) dt \\ &= \int_0^{2T/3} (1) dt \\ &= 2T/3 \end{aligned}$$

หาค่า  $\phi_2(t)$  จากสมการที่ (6) และ (8) โดย

$$\begin{aligned} g_2(t) &= s_2(t) - s_{21} \phi_1(t) \\ \phi_2(t) &= [s_2(t) - s_{21} \phi_1(t)] / \sqrt{\int_0^T (s_2(t) - s_{21} \phi_1(t))^2 dt} \\ &= [s_2(t) - s_{21} \phi_1(t)] / \sqrt{\int_0^T s_2^2(t) dt - 2 s_{21} \int_0^T s_2(t) \phi_1(t) dt + s_{21}^2 \int_0^T \phi_1^2(t) dt} \\ &= [s_2(t) - s_{21} \phi_1(t)] / \sqrt{E_2 - s_{21}^2} \\ &= \begin{cases} \sqrt{3/T} & ; (T/3) \leq t \leq 2T/3 \\ 0 & ; \text{ค่าเวลาอื่นๆ} \end{cases} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 Minimum Shift Keying [MSK]

MSK เป็นเทคนิคการ Modulate ทางดิจิทัล ซึ่งอาจพูดได้ว่าเป็นส่วนย่อยของ FSK คือสัญญาณ MSK จะเป็นสัญญาณที่มีเฟสต่อเนื่องกันตลอดเทียบได้กับสัญญาณ CPFSK (continuous phase frequency shift keying) และความถี่  $f_1, f_2$  ของสัญญาณ MSK ที่ใช้ในการส่ง symbol "1" และ "0" จะต้อง Orthogonal กัน เพื่อป้องกันการรบกวนซึ่งกันและกันในการ detect รวมทั้งทำให้ระยะห่างระหว่างความถี่ทั้งสองมีค่าน้อยที่สุด (Minimum shift) คือ เท่ากับ  $\text{bit rate}/2$

สัญญาณ MSK เหมาะที่จะใช้กับช่องสัญญาณที่มี bandwidth แคบ เพราะมี mainlobe น้อยและ Power spectral density ตกลงอย่างรวดเร็ว

พิจารณาสัญญาณ CPFSK ภายในช่วงเวลา  $0 \leq t \leq T_b$  ได้ดังนี้

$$s(t) = \begin{cases} \sqrt{2E_b/T_b} \cos[2\pi f_1 t + \theta(0)] & ; \text{เมื่อส่ง Symbol 1} \\ \sqrt{2E_b/T_b} \cos[2\pi f_2 t + \theta(0)] & , \text{เมื่อส่ง Symbol 0} \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อ  $E_b$  คือ พลังงานของสัญญาณในหนึ่ง bit

$T_b$  คือ ช่วงเวลา 1 bit

$\theta(0)$  คือ เฟสของสัญญาณที่เวลา  $t = 0$  จะขึ้นอยู่กับกระบวนการ modulate ที่จะทำ ให้เฟส  $\theta(0)$  ต่อเนื่องกับเฟสของ Symbol ที่ส่งไปก่อนหน้านั้น (ช่วงบิตต่อบิต)

สัญญาณ CPFSK สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัญญาณ Angle - Modulate ดังนี้

$$s(t) = \sqrt{2E_b/T_b} \cos[2\pi f_c t + \theta(t)] \quad (2)$$

เมื่อ  $\theta(t)$  คือ เฟสของสัญญาณ  $s(t)$  ซึ่งต่อเนื่องกันตลอดเวลารวมทั้งช่วงต่อบิต

$$f_c = 1/2 (f_1 + f_2) \quad (3)$$

แทนค่า  $f_c$  ในสมการ (2) จะได้

$$s(t) = \sqrt{2E_b/T_b} \cos[\pi(f_1 + f_2)t + \theta(t)] \quad (4)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (1) และ (4) ในช่วงเวลา  $0 \leq t \leq T_b$  เมื่อส่ง Symbol 1

$$2\pi f_1 t + \theta(0) = \pi(f_1 + f_2)t + \theta(t)$$

$$\theta(t) = \pi(f_1 - f_2)t + \theta(0) \text{ เมื่อส่ง Symbol 1} \quad (5)$$

$$2\pi f_2 t + \theta(0) = \pi(f_1 + f_2)t + \theta(t)$$

$$\theta(t) = \pi(f_2 - f_1)t + \theta(0) \text{ เมื่อส่ง Symbol 0} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{กำหนดให้ } h = T_b(f_1 - f_2) \quad (7)$$

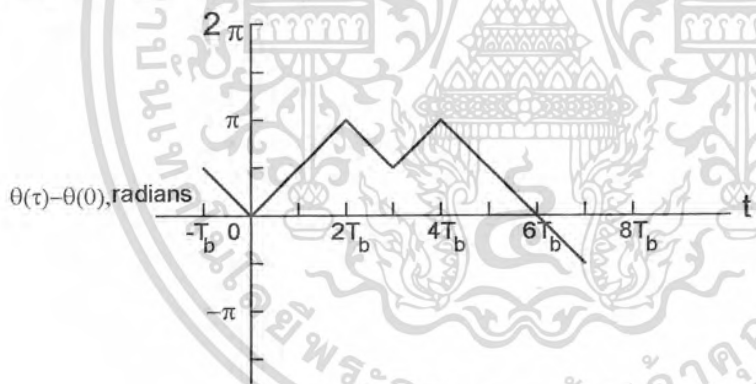
เมื่อ  $h$  คือ อัตราส่วนเบี่ยงเบนหรือ modulation index แทนค่า  $h$  ในสมการที่ (5) และ (6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \theta(0) + \pi h t / T_b ; \text{ เมื่อส่ง Symbol 1} \\ \theta(t) &= \theta(0) - \pi h t / T_b ; \text{ เมื่อส่ง Symbol 0} \end{aligned} \quad (8)$$

พิจารณาที่เวลา  $t = T_b$  จะได้

$$\begin{aligned} \theta(T_b) - \theta(0) &= \pi h ; \text{ เมื่อส่ง Symbol 1} \\ &= -\pi h ; \text{ เมื่อส่ง Symbol 0} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าเฟสของสัญญาณ  $S(t)$  ในขณะส่ง Symbol 1 จะเพิ่มขึ้น  $\pi h$  เรเดียน และขณะส่ง Symbol 0 ก็ลดลง  $\pi h$  เรเดียนเช่นกัน หากเรากำหนดให้  $\pi h$  มีค่าเป็น  $1/2$  จะมีผลให้เฟสของสัญญาณ  $S(t)$  มีค่าเป็น  $\pi/2$  หรือ  $-\pi/2$  เมื่อ  $T_b$  เป็นจำนวนคี่และเป็น 0 หรือ  $\pi$  เมื่อ  $T_b$  เป็นจำนวนคู่ ดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดง  $\theta(t) - \theta(0)$  เมื่อ  $h=1/2$  และ input sequence คือ 0110 1000 และ  $\theta$

$$(-T_b) - \theta(0) = \pi/2$$

$$\text{จากสมการที่ (2) เมื่อ } S(t) = \sqrt{2E_b/T_b} \cdot \cos[2\pi f_c t + \theta(t)]$$

เราสามารถกระจายให้อยู่ในเทอมของ Inphase Channel และ Quadrature Chann

$$\text{โดย } \cos(A+B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$$

$$\text{ดังนั้น } S(t) = \sqrt{2E_b/T_b} \cos[\theta(t)] \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{2E_b/T_b} \sin[\theta(t)] \sin(2\pi f_c t)$$

พิจารณาเทอมแรก Inphase Channel  $[\cos[\theta(t)]]$  จะมีเครื่องหมายเป็นบวกหรือลบภายในช่วงเวลา  $-T_b \leq t \leq T_b$  ขึ้นอยู่กับเฟส  $\theta(0)$  เท่านั้น ดังนั้นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 s_c(t) &= \sqrt{2E_b/T_b} \cos[\theta(t)] \\
 &= \sqrt{2E_b/T_b} \cos[\theta(0)] \cos(\pi t/2T_b) \\
 &= \pm \sqrt{2E_b/T_b} \cos(\pi t/2T_b); -T_b \leq t \leq T_b
 \end{aligned}$$

เครื่องหมายบวกจะเกิดเมื่อ  $\theta(0)=0$  และเครื่องหมายลบจะเกิดเมื่อ  $\theta(0)=\pi$

ในทำนองเดียวกันพิจารณาเทอมที่สองของ  $s(t)$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบทาง Quadrature Channel ภายในช่วงเวลา  $0 \leq t \leq 2T_b$  เครื่องหมายของ  $\sin[\theta(t)]$  จะขึ้นอยู่กับเฟส  $\theta(T_b)$  เท่านั้น

$$\begin{aligned}
 s_s(t) &= \sqrt{2E_b/T_b} \sin[\theta(t)] \\
 &= \sqrt{2E_b/T_b} \sin[\theta(T_b)] \sin(\pi t/2T_b) \\
 &= \pm \sqrt{2E_b/T_b} \sin(\pi t/2T_b)
 \end{aligned}$$

เครื่องหมายจะเป็นบวกเมื่อ  $\theta(T_b)=\pi/2$  และเป็นลบเมื่อ  $\theta(T_b)=-\pi/2$

จากการที่เรากำหนดให้  $h=1/2$  ทำให้ผลต่างระหว่างความถี่  $f_1$  และ  $f_2$  มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของบิตเรท และผลต่างระหว่าง  $f_1$  และ  $f_2$  นี้คือ ค่าที่น้อยที่สุดของสัญญาณ CPFSK เนื่องจากสัญญาณทั้งสองในสมการที่ (1) จะ Orthogonal กันและจะไม่รบกวนซึ่งกันในการ Detect เพราะว่า

$$\int_0^T \phi_1 \phi_2(t) dt = 0$$

เมื่อสัญญาณสองสัญญาณ Orthogonal กันผลต่างระหว่างความถี่ทั้งสองที่มีค่าน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ bit rate/2 ( $1/2T$ ) ดังนี้

$$\int_0^T \cos 2\pi f_1 t \cos 2\pi f_2 t dt = 0$$

$$\text{จาก } \cos A \cdot \cos B = 1/2 \cos(A+B) + 1/2 \cos(A-B)$$

$$\text{ดังนั้น } 0 = 1/2 \int_0^T \cos 2\pi(f_1+f_2)t dt + 1/2 \int_0^T \cos 2\pi(f_1-f_2)t dt$$

$$= 1/2 \sin 2\pi(f_1+f_2)T / 2\pi(f_1+f_2) + 1/2 \sin 2\pi(f_1-f_2)T / 2\pi(f_1-f_2)$$

$$\text{เมื่อ } f_1+f_2 \neq 1; \sin 2\pi(f_1+f_2)T / 2\pi(f_1+f_2) \approx 0$$

$$\therefore 1/2 \sin 2\pi(f_1-f_2)T / 2\pi(f_1-f_2) = 0$$

$$\sin 2\pi(f_1-f_2)T = 0$$

$$\sin X = 0 \text{ เมื่อ } X = n\pi; n \text{ เป็นจำนวนเต็ม}$$

$$2\pi(f_1-f_2)T = n\pi$$

$$f_1-f_2 = n/2T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่า  $n$  ที่ทำให้  $f_1 - f_2$  มีค่าน้อยที่สุดคือ  $n=1$

$$\therefore f_1 - f_2 = 1/2T$$

เนื่องจากเฟส  $\theta(0)$  และ  $\theta(T_b)$  แต่ละตัวจะมีค่าได้เพียง 2 ค่า ดังนั้นเฟสของสัญญาณ MSK จะเป็นได้ทั้งหมด 4 กรณี คือ

1. เฟส  $\theta(0)=0$  และ  $\theta(T_b)=\pi/2$  จะเกิดเมื่อส่ง Symbol 1
2. เฟส  $\theta(0)=\pi$  และ  $\theta(T_b)=\pi/2$  จะเกิดเมื่อส่ง Symbol 0
3. เฟส  $\theta(0)=\pi$  และ  $\theta(T_b)=-\pi/2$  จะเกิดเมื่อส่ง Symbol 1
4. เฟส  $\theta(0)=0$  และ  $\theta(T_b)=-\pi/2$  จะเกิดเมื่อส่ง Symbol 0

สัญญาณ MSK ทั้ง 4 นี้ สามารถแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$s(t) = \sqrt{2E_b/T_b} \cos[\theta(0)] \cos(\pi t/2T_b) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{2E_b/T_b} \sin[\theta(T_b)] \sin(\pi t/2T_b) \sin(2\pi f_c t) \quad (9)$$

เมื่อ  $0 \leq t \leq T_b$

จากสมการที่ (9) นี้ เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Orthonormal Function

$\phi_1(t)$  และ  $\phi_2(t)$  โดย

$$\phi_1(t) = \sqrt{2/T_b} \cos(\pi t/2T_b) \cos(2\pi f_c t); 0 \leq t \leq 2T_b \quad (10)$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{2/T_b} \sin(\pi t/2T_b) \sin(2\pi f_c t); 0 \leq t \leq 2T_b \quad (11)$$

ดังนั้นเราสามารถแทนสัญญาณ MSK ให้อยู่ในรูปของ

$$s(t) = s_1 \phi_1(t) + s_2 \phi_2(t); 0 \leq t \leq T_b \quad (12)$$

โดยสัมประสิทธิ์  $s_1$  และ  $s_2$  สัมพันธ์กับเฟส  $\theta(0)$  และ  $\theta(T_b)$  ตามลำดับ เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์  $s_1$  ได้โดยการอินทิเกรตผลคูณของ  $s(t)\phi_1(t)$  ในช่วง  $-T_b$  ถึง  $T_b$  ดังนี้

$$s_1 = \int_{-T_b}^{T_b} s(t)\phi_1(t) dt$$

$$s_1 = \int_{-T_b}^{T_b} [\sqrt{2E_b/T_b} \cos[\theta(0)] \cos(\pi t/2T_b) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{2E_b/T_b} \sin[\theta(T_b)] \sin(\pi t/2T_b) \sin(2\pi f_c t)] \phi_1(t) dt$$

$$= \int_{-T_b}^{T_b} \sqrt{2E_b/T_b} \cos[\theta(0)] \cos(\pi t/2T_b) \cos(2\pi f_c t) \phi_1(t) dt - \int_{-T_b}^{T_b} \sqrt{2E_b/T_b} \sin[\theta(T_b)] \sin(\pi t/2T_b) \sin(2\pi f_c t) \phi_1(t) dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_1 = \sqrt{E_b} \cos[\theta(0)] \int_{-T_b}^{T_b} [\sqrt{2/T_b} \cos(\pi/2T_b)(\cos(2\pi f_c l))] [\sqrt{2/T_b} \cos(\pi t/2T_b) \cos(2\pi f_c l)] dl - \sqrt{E_b} \sin[\theta(T_b)] \int_{-T_b}^{T_b} [\sqrt{2/T_b} \sin(\pi/2T_b l) \sin(2\pi f_c l)] [\sqrt{2/T_b} \cos(\pi t/2T_b) \cos(2\pi f_c l)] dl$$

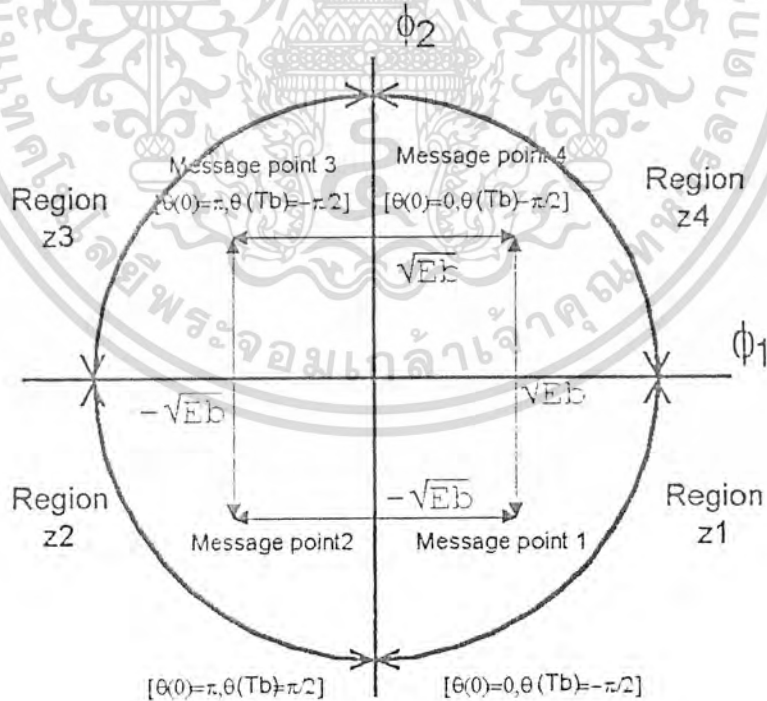
จากคุณสมบัติของ Orthonormal function

$$\int_0^T \phi_n(t)\phi_m(t)dt = \begin{matrix} 1 ; n=m \\ 0 ; n \neq m \end{matrix}$$

$$\therefore S_1 = \sqrt{E_b} \cos[\theta(0)] \tag{13}$$

ในทำนองเดียวกันเราหาค่าสัมประสิทธิ์  $S_2$  ช่วง 0 ถึง  $2T_b$

$$S_2 = \int_0^{2T_b} s(t)\phi_2(t)dt = -\sqrt{E_b} \sin[\theta(T_b)] \tag{14}$$



รูปที่ 9 Signal space diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

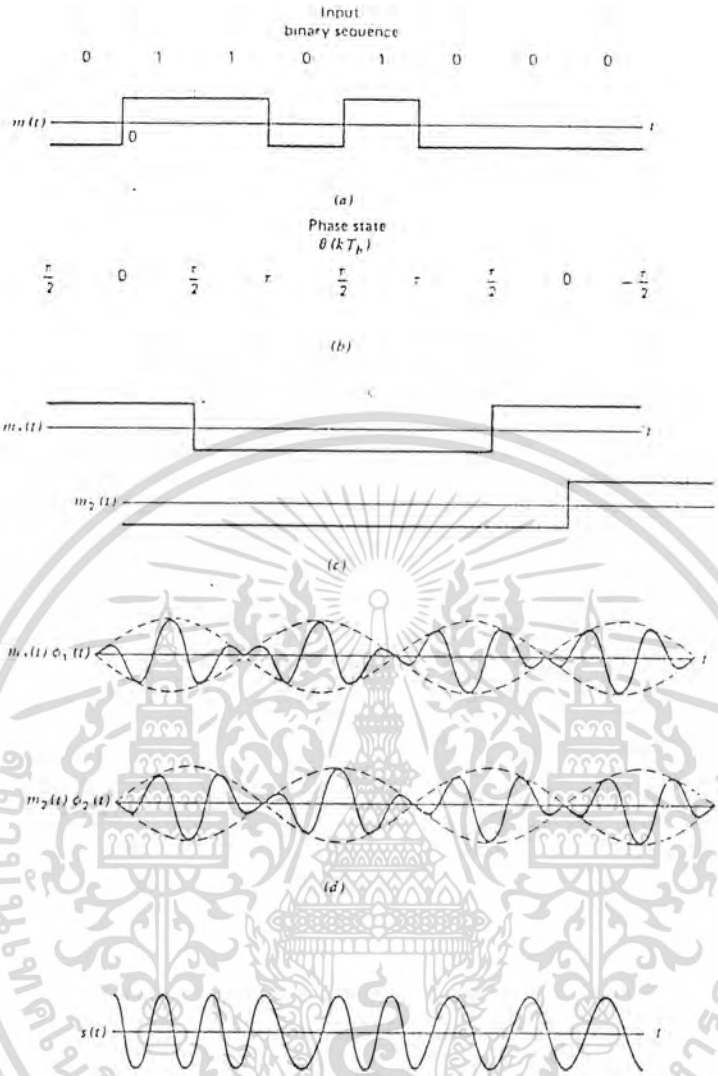
จากรูปสัญญาณ MSK จะมี Dimension,  $N=2$  และ Message Point,  $M=4$   
 แต่ละ Message Point จะมี Coordinate ดังนี้  
 $(+\sqrt{E_b}, -\sqrt{E_b})$ ,  $(-\sqrt{E_b}, -\sqrt{E_b})$ ,  $(-\sqrt{E_b}, +\sqrt{E_b})$  และ  $(+\sqrt{E_b}, +\sqrt{E_b})$

Transmitted binary symbol $0 \leq t \leq T_b$	phase states (radians)		Coordinates of message points	
	$\theta(0)$	$\theta(T_b)$	$S_1$	$S_2$
1	0	$+\pi/2$	$+\sqrt{E_b}$	$-\sqrt{E_b}$
0	$\pi$	$+\pi/2$	$-\sqrt{E_b}$	$-\sqrt{E_b}$
1	$\pi$	$-\pi/2$	$-\sqrt{E_b}$	$+\sqrt{E_b}$
0	0	$-\pi/2$	$+\sqrt{E_b}$	$+\sqrt{E_b}$

$(+\sqrt{E_b}, +\sqrt{E_b})$

ตารางที่ 3

ค่าของ  $\theta(0)$  และ  $\theta(T_b)$  ที่สอดคล้องกับสัณประสิทธิ์  $S_1$  และ  $S_2$  แสดงไว้ใน  
 ตาราง โดยช่องแรกของตารางจะแสดงถึง Symbol 1 และ 0 ที่ส่งออกไปในช่วงเวลา  $0 \leq t \leq T_b$   
 หมายเหตุ ค่าสัณประสิทธิ์  $S_1$  และ  $S_2$  จะมีเครื่องหมายเหมือนกันเมื่อส่ง Symbol 0 และมี  
 เครื่องหมายต่างกันเมื่อส่ง Symbol 1



รูปที่ 12

- (a) Input binary  $m(t)$
- (b) เฟส  $\theta(t)$  เมื่อ  $t=Kt_b$  และ  $K$  เป็นจำนวนเต็มบวก
- (c)  $m(t)$  ซึ่งแยกออกเป็น  $m_1(t)$  และ  $m_2(t)$
- (d) สัญญาณที่ถูก modulate แล้ว  $m_1(t)\phi_1(t)$  และ  $m_2(t)\phi_2(t)$
- (e) สัญญาณ MSK  $s(t)$

จากรูปที่ 12 input binary sequence ที่ป้อนเข้ามาคือ 0110 1000 แทนด้วย

สัญญาณ binary  $m(t)$  ดังในรูป (a) กำหนดให้ค่าของ  $\theta(-T_b) = \pi/2$  เรเดียน และ  $\theta(KT_b)$  เมื่อ  $K=0,1,2,\dots$  ดังในส่วน (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\theta(0)=0$  และ  $\theta(T_b)=\pi/2$  เรเดียน เราจะหาค่าสัมประสิทธิ์  $S_1$  และ  $S_2$  ได้คือ

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{E_b} \cos[\theta(0)] \\ &= \sqrt{E_b} \\ S_2 &= -\sqrt{E_b} \sin[\theta(T_b)] \\ &= -\sqrt{E_b} \end{aligned}$$

กำหนดให้  $m_1(t)=S_1$  ;  $-T_b \leq t \leq T_b$

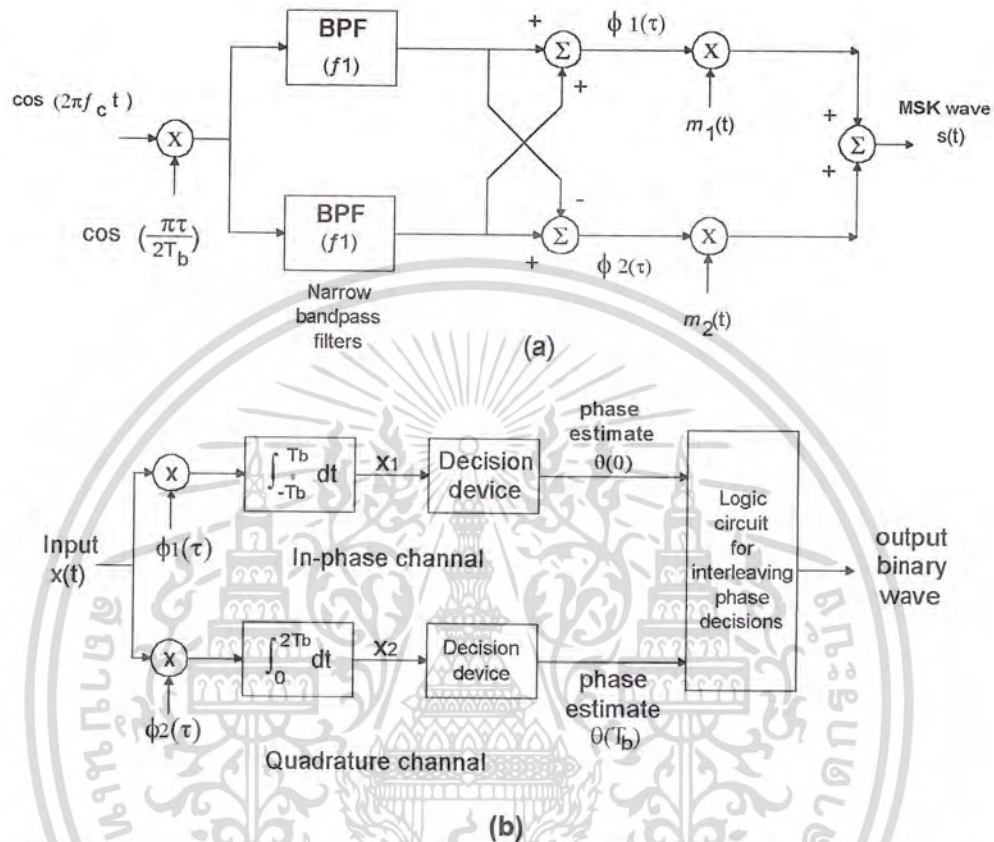
$$m_2(t)=S_2$$
 ;  $0 \leq t \leq 2T_b$

เมื่อเราส่ง Symbol 1 เฟสของสัญญาณ MSK  $S(t)$  จะเพิ่มขึ้น  $\pi/2$  เรเดียน และเมื่อส่ง Symbol 0 เฟสของสัญญาณ  $S(t)$  ก็จะลดลง  $\pi/2$  เรเดียนเช่นกัน ดังนั้นหากเราส่ง 2 Symbol 01 หรือ 10 เฟสของสัญญาณ MSK จะไม่เปลี่ยนแปลง คือ มีค่าเท่ากับตอนเริ่มต้น และถ้าหากเราส่ง 2 Symbol 11 หรือ 00 เฟสของสัญญาณ MSK เมื่อสิ้นสุด Symbol ที่สอง จะเปลี่ยนแปลงไป  $+\pi$  หรือ  $-\pi$  เรเดียน ดังนั้นภายในช่วงเวลา  $0 \leq t \leq 3T_b$  เราสามารถกำหนด  $m_1(t)$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} m_1(t) &= S_1 \quad ; \quad \text{ในช่วงเวลา } 0 \leq t \leq 2T_b \quad ; \quad \text{ส่ง } 10 \text{ หรือ } 01 \\ &= -S_1 \quad ; \quad \text{ในช่วงเวลา } 0 \leq t \leq 2T_b \quad ; \quad \text{ส่ง } 11 \text{ หรือ } 00 \\ m_2(t) &= S_2 \quad ; \quad \text{ในช่วงเวลา } T_b \leq t \leq 3T_b \quad ; \quad \text{ส่ง } 10 \text{ หรือ } 01 \\ &= -S_2 \quad ; \quad \text{ในช่วงเวลา } T_b \leq t \leq 3T_b \quad ; \quad \text{ส่ง } 11 \text{ หรือ } 00 \end{aligned}$$

$m_1(t)$  และ  $m_2(t)$  แสดงได้ดังใน ส่วน (c) ของรูป สำหรับสัญญาณ MSK  $S(t)$  ในทุกช่วงเวลาสามารถแทนได้โดย  $S(t)=m_1(t)\phi_1(t)+m_2(t)\phi_2(t)$  สัญญาณ  $m_1(t)\phi_1(t)$  และ  $m_2(t)\phi_2(t)$  คือ สัญญาณที่ถูก Modulate และแสดงไว้ในส่วน (d) ของรูปสุดท้ายเมื่อเรารวมสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกันจะได้สัญญาณ MSK ดังในส่วน (e) ของรูป

[Block Diag ของเครื่องส่งและเครื่องรับ MSK]



รูปที่ 13 บล็อกไดอะแกรมของ (a) MSK transmitter and (b) MSK receiver

ในรูป 13 (a) แสดงถึง block diagram ของเครื่องส่ง MSK ซึ่งจะมีสัญญาณ

Sine wave สองสัญญาณ คือ สัญญาณแรกมีความถี่  $f_c = N_c / 4T_b$  เมื่อ  $N_c$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวกและอีกสัญญาณมีความถี่  $1/2T_b$  ป้อนให้กับ product modulator เพื่อสร้างสัญญาณความถี่  $f_1$  และ  $f_2$  ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของสัญญาณ MSK คือ

$$f_c = (f_1 + f_2) / 2$$

และ  $1/2 = f_1 + f_2 / T_b$

สัญญาณ  $f_1$  และ  $f_2$  จะถูกแยกออกจากกันโดยใช้ Narrow Band Pass Filter 2 ตัว มีความถี่ศูนย์กลางที่  $f_1$  และ  $f_2$  ตามลำดับ สัญญาณความถี่  $f_1$  และ  $f_2$  ที่ได้จะถูกนำมาสร้าง Quadrature Carrier 2 สัญญาณ ซึ่งก็คือ Orthonormal basic function  $\phi_1(t)$  และ  $\phi_2(t)$  และสุดท้ายจะคูณด้วยสัญญาณ binary  $m_1(t)$  และ  $m_2(t)$  ซึ่งสัญญาณทั้งสองนี้จะมี bit rate เท่ากับ  $1/2T_b$  เมื่อนำมา รวมกันจะได้สัญญาณ MSK

ในรูป 13(b) แสดง Block diagram ของเครื่องรับ MSK สัญญาณที่รับได้  $x(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

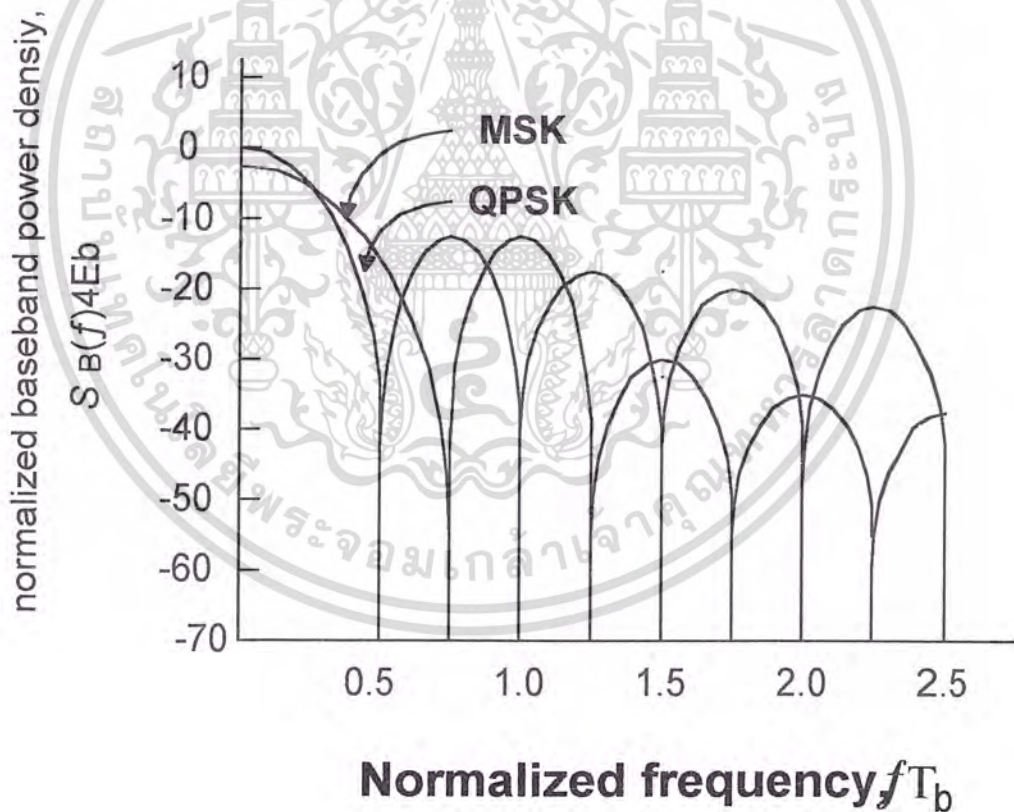
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกคูณด้วยสัญญาณ  $\phi_1(t)$  และ  $\phi_2(t)$  จากนั้นจะอินทิเกรตผลคูณที่ได้ โดยที่ทั้งสอง channel จะใช้ช่วงเวลาการอินทิเกรตเท่ากัน คือ  $2T_b$  วินาที แต่ใน Quadrature Channel  $[\phi_2(t)]$  จะถูกหน่วงเวลาไป  $T_b$  วินาที เมื่อเทียบกับ Inphase Channel ผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบสัญญาณ เพื่อตัดสินใจและสร้างสัญญาณ Binary  $[m(t)]$  ขึ้นมาที่ภาครับ

**[Baseband Power Spectral Density ]**

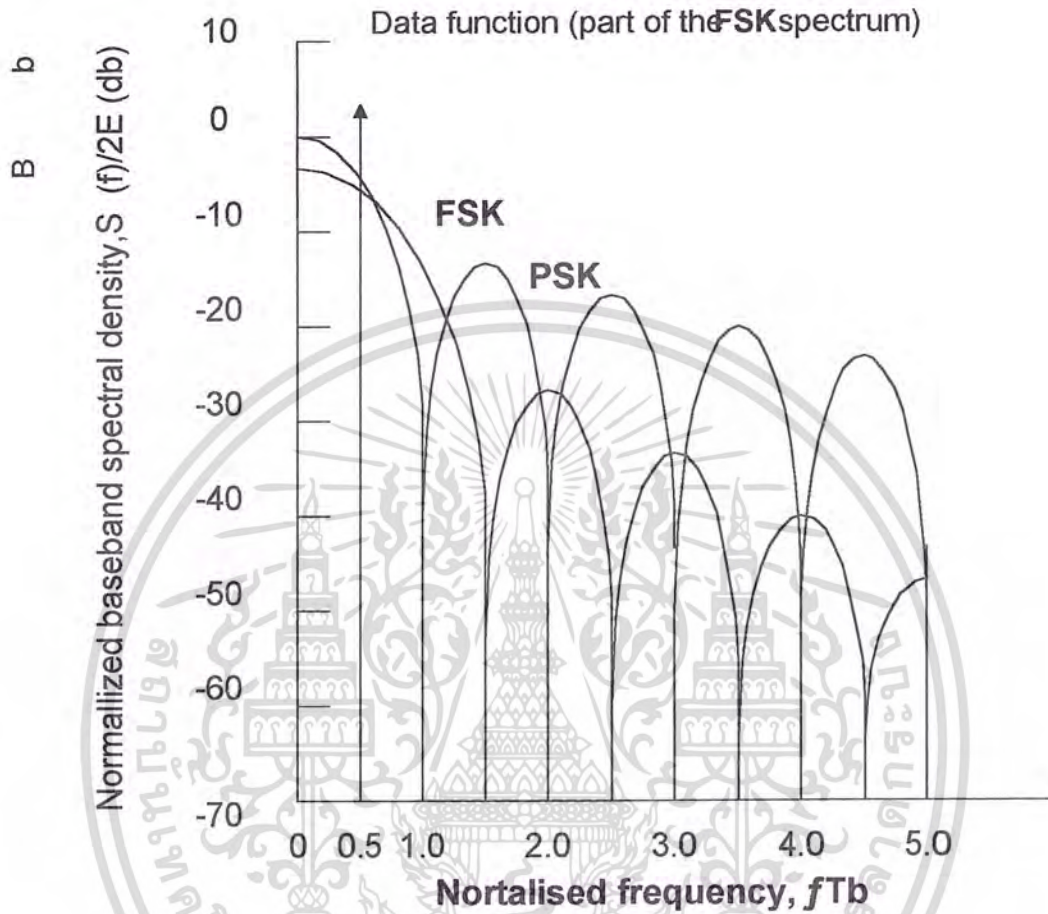
Baseband Power spectral density ของสัญญาณ MSK เท่ากับ

$$S_B(f) = 32E_b/\pi^2 [\text{Cos}(2\pi T_b f)/16T_b^2 f^2 - 1] \tag{15}$$



รูปที่ 14 Power spectral density ของ QPSK และ MSK

พิจารณาจากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่า Baseband power spectral density ของสัญญาณ MSK จะลดลงเร็วกว่าสัญญาณ QPSK ซึ่งหมายความว่า MSK จะไม่ทำให้เกิด Interference มากเท่ากับสัญญาณ QPSK นี่คือข้อได้เปรียบของ MSK เมื่อเรามี Bandwidth ที่จำกัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 แสดง Power spectral density ของ FSK และ PSK

เมื่อดูจากรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าสัญญาณ MSK จะมี Mainlobe ที่กว้างกว่าสัญญาณ QPSK อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ PSK และ FSK ในรูปที่ 10.21 จะเห็นว่าสัญญาณ MSK จะมี Mainlobe เพียง 75% และ 50% ของสัญญาณ PSK และ FSK ตามลำดับ ดังนั้นหากใช้ Bandwidth เท่ากัน MSK สามารถใช้อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (bit rate) ได้เป็นสองเท่าของ FSK เนื่องจากสัญญาณ MSK และ QPSK มี Signal space diagram ที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงมีค่าเฉลี่ยของ Probability of symbol error  $[P_e]$  เท่ากัน คือ

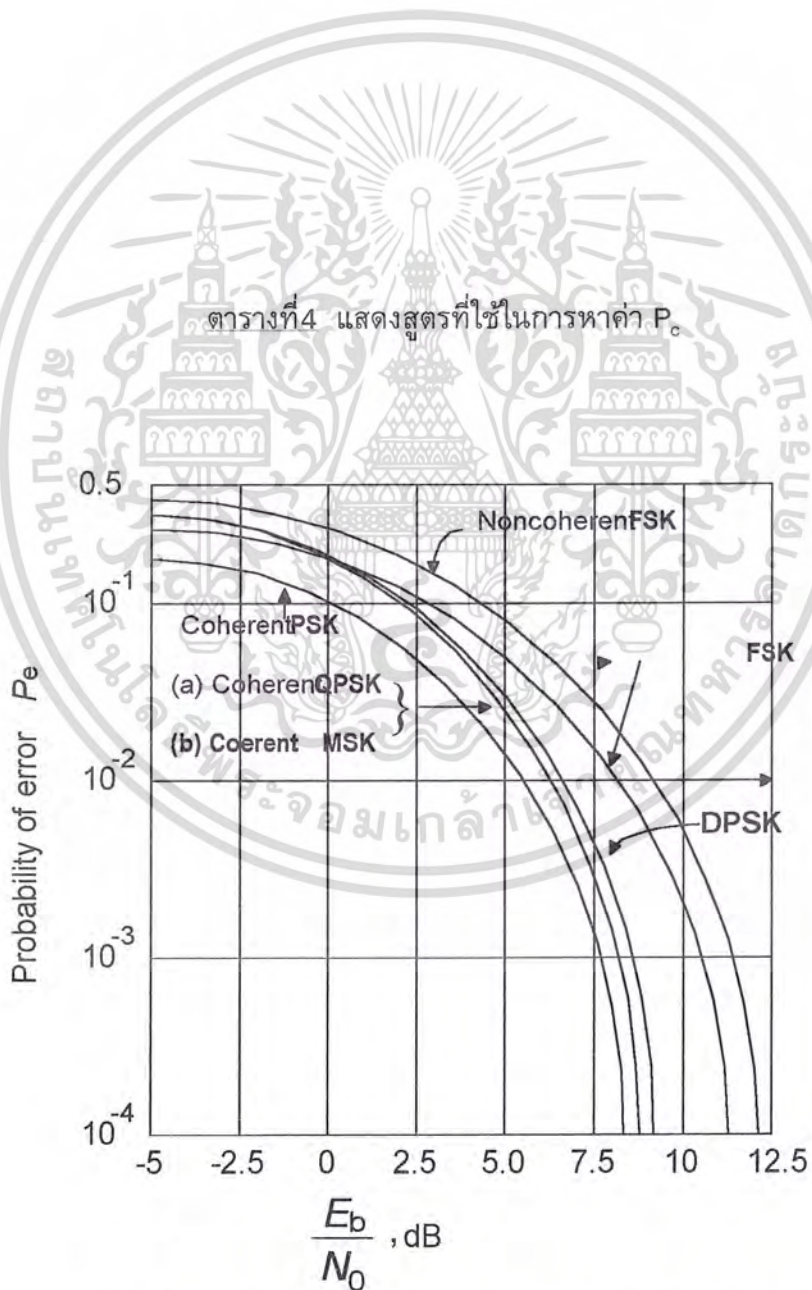
$$P_e = \text{erfc}(\sqrt{E_b/N_0}) - 1/4 \text{erfc}^2(E_b/N_0) \tag{16}$$

เมื่อ  $\text{erf}(u) = 2/\pi \int_0^u \exp(-Z^2) dz$

$\text{erfc}(u) = 1 - \text{erf}(u)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ Probability of symbol error ของการส่งข้อมูลในระบบต่าง ๆ จะใช้สูตรในตารางที่ 4



รูปที่ 16 เปรียบเทียบค่า  $P_e$  ของระบบต่างๆ โดยใช้ตาราง 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบค่า  $P_e$  ของระบบต่างๆ จะคิดในฟังก์ชันของ  $E_b/N_0$  (energy-to-noise density ratio) เพราะระบบต่างๆ จะใช้จำนวนบิตในการส่งแต่ละ symbol ไม่เท่ากัน

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่า QPSK และ MSK จะมีโอกาสเกิด symbol error เมื่อ  $E_b/N_0$  มีค่าต่ำ แต่โอกาสในการเกิด symbol error จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $E_b/N_0$  มีค่าเพิ่มขึ้น

โดยสรุปแล้วในทางปฏิบัติการที่จะเลือกใช้ระบบใด สิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือการสิ้นเปลือง bandwidth ซึ่งมีอยู่จำกัด สัญญาณ MSK จึงเหมาะที่จะใช้กับช่องสัญญาณที่มี bandwidth แคบ เพราะมี mainlobe น้อย(ใกล้เคียงกับ QPSK) และยังมีข้อได้เปรียบ คือเกิด ISI น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ FSK, PSK, QPSK เนื่องจาก Power spectral density จะตกลงอย่างรวดเร็ว และยังมีโอกาสที่จะเกิด symbol Error ใกล้เคียงกับระบบอื่น



## 2.4 GAL (Generic Array Logic)

จากไอซี PAL ที่สามารถเลือกชนิดการทำงานของเอาต์พุตแบบต่าง ๆ กันได้ เช่น ทำงานที่ลอจิก "H" (active high) หรือ "L" (active low) หรือเป็นแบบรีจิสเตอร์ที่สามารถออกแบบวงจรซีควนเชียล (sequential) ได้ทำให้มีการพัฒนามาเป็น GAL โดยที่ GAL 1ตัวจะสามารถใช้แทน PAL แบบต่าง ๆ ได้มากมายและ Program ได้ 100 ครั้ง

จากอุปกรณ์ไอซีตระกูล PAL (Programable Array Logic) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทางโรงงานผู้ผลิตได้บรรจุวงจรถูกพื้นฐานแบบต่าง ๆ เช่น AND เกท, OR เกท, อินเวอร์เตอร์รวมไว้ในตัวเดียวกัน ผู้ใช้สามารถออกแบบเชื่อมโยงวงจรถูกเหล่านี้เข้าด้วยกันได้ เพื่อให้วงจรถูกจัดลอจิก มีฟังก์ชันการทำงานความต้องการอุปกรณ์ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้นี้จะมีชื่อเรียกรวมกันว่า PLD (Programable Logic Device) ซึ่งก็มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และ PAL ก็เป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งในจำพวก PLD

### คุณสมบัติ GAL

ใช้เทคโนโลยี E<sup>2</sup>CMOS (Electrically Erasable CMOS) มีข้อดี คือ

- เวลาหน่วง (Propagation delay) สูงสุด 15 นาโนวินาที
- ใช้ความถี่สูงสุด 50 MHz
- เวลาที่ใช้สูงสุดจากคล็อกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เอาต์พุต 12 นาโนวินาที
- คุณสมบัติเอาต์พุตเหมือนกับไอซีทีทีแอล (TTL) รับกระแสได้ 24 mA

ใช้พลังงานเพียงครั้งเดียวของอุปกรณ์ โปสิทีฟไป คือ กระแสสูงสุด (I<sub>cc</sub>) เพียง 45 mA เท่านั้น

โครงสร้างเป็น E<sup>2</sup>CELL จึงทำให้

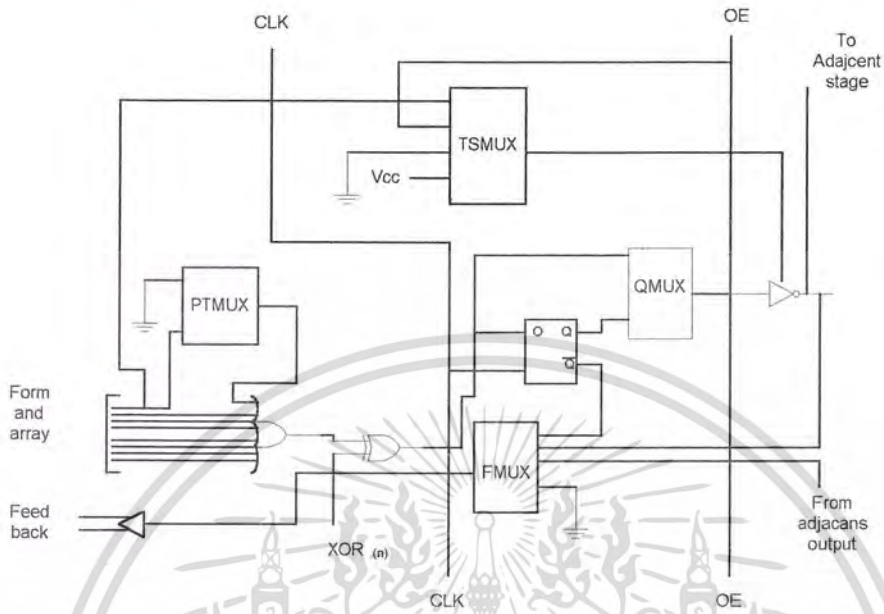
- สามารถกำหนดลอจิกการทำงานใหม่ได้
- ผ่านการทดสอบที่แน่นอนแล้ว
- ใช้ความเร็วในการลบโปรแกรมด้วยไฟฟ้าน้อยกว่า 50 ms
- เก็บรักษาข้อมูลได้นาน 20 ปี

เอาต์พุตลอจิกมาโครเซลล์ หรือ OLMC (Output Logic Macrocell) 8 เอาต์พุต ทำให้

- สะดวกต่อการออกแบบวงจรลอจิกที่ซับซ้อนมากได้
- สามารถโปรแกรมเอาต์พุตให้ทำงานที่ลอจิก "H" หรือ "L" ได้
- GAL 20 v8 สามารถจำลองใช้แทน PAL ขนาด 24 ขา

มีการรีโหลดและเพาเวอร์ออนรีเซต (Power On reset) ของทุกรีจิสเตอร์

## เอาต์พุตลอจิกมาโครเซลล์ (OLMC)



รูปที่ 17 บล็อกไดอะแกรมของเอาต์พุตลอจิกมาโครเซลล์ (OLMC)

จากบล็อกไดอะแกรมของ GAL จะเห็นได้ว่ามีวงจรแปลก ๆ ที่ชื่อ OLMC ซึ่งเจ้า

### OLMC

หรือเอาต์พุตลอจิกมาโครเซลล์นี้จะเป็นหัวใจในการที่ทำให้ GAL นี้สามารถใช้แทน PAL ได้หลายๆ เบอร์

### เอาต์พุตลอจิกมาโครเซลล์ (OLMC)

บล็อกไดอะแกรมของเอาต์พุตลอจิกมาโครเซลล์ หรือ OLMC แสดงในรูปที่ 16 เอาต์พุตของแอนด์เกตในส่วนแอนดอะเรย์จะป้อนเข้ามายัง OLMC แล้วใช้โปรแกรมการทำงานของ OLMC ได้ 3 โหมด เพื่อให้ได้เอาต์พุตลอจิกแบบต่างๆ ตามต้องการ ซึ่งการโปรแกรมเลือกโหมดการทำงานนี้ จะถูกทำโดยซอฟต์แวร์หรือฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการออกแบบ GAL เองโดยอัตโนมัติซึ่งผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องไปสนใจการโปรแกรมมันเลย

**โหมดการทำงานของ OLMC** มีด้วยกัน 3 โหมด คือ

- ซิมเปิลโหมด (simple mode)
- คอมเพล็กซ์โหมด (complex mode)
- รีจิสเตอร์โหมด (registered mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ซิมเปิลโหมด (Simple mode)

โครงสร้างเอาต์พุตจะเหมือนกับของ PAL10L8 18H4 และ 16P6 แต่สามารถโปรแกรมอินพุตและเอาต์พุตให้ทำงานที่ลอจิก "L" หรือ "H" ได้

เอาต์พุตทั้งหมดจะเป็นของข้อมูลจากโปรดักเทอม(จากเอาต์พุตทั้ง 6 ของ AND เกต)มาเข้า OR เกต โดยแต่ละเอาต์พุตสามารถโปรแกรมให้ทำงานที่ลอจิก "L" หรือ "H" ได้ (Programable polarity) โนโหมดนี้ขา OE และ CLK (ขา 1 และ 11 ของ GAL16V8, ขา 1 และ 13 ของ 20V8) จะไม่ได้ใช้ทำให้ใช้เป็นขาอินพุตป้อนสัญญาณเข้า AND อะเรย์ได้

### คอมเพล็กซ์โหมด (Complex mode)

โนโหมดนี้จะมีขาที่เป็นอินพุต/เอาต์พุตได้สูงสุด 6 ตัว (ขา) โดย OLMC อีก 2 ตัว (ขา 12 และ 19 ของ 16V8, ขา 15 และ 22 ของ 20V8) จะเป็นเอาต์พุตได้อย่างเดียวสัญญาณอินพุตหรือเอาต์พุตจะสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของอินพุต/เอาต์พุตได้

เอาต์พุตของ OLMC ทั้งหมดจะได้จากโปรดักเทอม 7 เทอมต่อ 1 เอาต์พุต โดยเฉลี่ยโปรดักเทอม 1 เทอม จะใช้ของ GAL16V8 ขา 1 และ 13 ของในการโปรแกรมสัญญาณ OE ซึ่งจเหมือนกับซิมเปิลโหมดที่ขา 1 และ 11 20V8 สามารถใช้เป็นขาอินพุตป้อนข้อมูลไปยัง AND อะเรย์ได้

### รีจิสเตอร์โหมด (Registered mode)

โนโหมดนี้ OLMC ทั้งหมดจะใช้สัญญาณ OE และ CLK ร่วมกับ OLMC แต่ละตัวจะสามารถทำงานเป็นรีจิสเตอร์หรืออินพุต/เอาต์พุตได้ โดยสามารถมีได้สูงสุด 8 ตัว สัญญาณอินพุตหรือเอาต์พุตสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของอินพุต/เอาต์พุตได้

### อิเล็กทรอนิกส์ซิกเนเจอร์ หรือ ES (Electronic Signature)

จะมีอยู่ใน GAL 16V8 และ GAL 20V8 ทุกตัว ES นี้จะเป็นหน่วยความจำที่สามารถโปรแกรมใหม่ได้ มีขนาด 64 บิต เพื่อให้ผู้ใช้สามารถป้อนข้อมูลของแต่ละคนได้ ES นี้จะไม่เกี่ยวข้องกับสถานะของซีเคียวริตี้เซลล์ (security cell) ภายใน ES จะมีข้อมูลของ checksum ไว้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เมื่อเปลี่ยนข้อมูลของ ES จะทำให้ Checksum เปลี่ยนค่าได้

### ซีเคียวริตี้เซลล์

ซีเคียวริตี้เซลล์ (security cell) มีไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ผู้อื่นมาลอกเลียนแบบ (copy) ข้อมูลภายในตัว GAL ของเราได้ หลังจากที่เรaprogram เซลล์นี้แล้ว จะทำให้ไม่สามารถอ่านข้อมูลภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AND อะเรย์ว่ามีการต่ออย่างไรเซลล์ชนิดนี้จะถูกลบไปได้อย่างเดียวด้วยการลบแบบบูลต์ (bulk erase cycle) ซึ่งข้อมูลทั้งหมดก็จะถูกลบไปพร้อมกันด้วย

### อินพุตบัฟเฟอร์

อินพุตบัฟเฟอร์ของ GAL ทั้งสองเบอร์นี้ออกแบบ เพื่อให้ใช้กับระดับแรงดันลอจิกของทีแอลดี โดยจะมีอิมพีแดนซ์สูงทำให้กินกระแสจากวงจรที่นำมาต่อกับมันน้อยกว่าที่เอาต์พุตยังสามารถนำไปต่อขับอุปกรณ์ลอจิกอื่น ๆ ได้มากกว่าที่ทีแอลแบบไบโพลาร์ทั่วไปด้วย

ที่อินพุตแต่ละตัวไม่มีการต่อพูล์อัพภายในดังนั้นขาอินพุตและขาไอโอแบบสามสถานะที่ไม่ได้ใช้ควรจะนำไปต่อกับอินพุตอื่นที่ใช้งาน หรือต่อไฟเลี้ยงหรือกราวด์ เพื่อลดระดับสัญญาณรบกวนและช่วยให้มีกินกระแส ( $I_{cc}$ ) น้อยลง

### เอาต์พุตรีจิสเตอร์ปริโหลด (Output register preload)

ในการทดสอบการทำงานในซีควเอนเชียลโหมดจะสามารถตั้งค่าเอาต์พุตของรีจิสเตอร์ได้ว่าการให้เป็น "L" หรือ "H" ได้ เพื่อกำหนดสถานะปัจจุบัน (present state) ได้แล้วจึงป้อนอินพุตเพื่อทดสอบสถานะถัดไป (next state) ว่าจะเป็นไปตามค่าที่ต้องการหรือไม่ และยังสามารถทดสอบการใช้งานตามความเป็นจริงคือ หลังจากตั้งค่าเอาต์พุตของรีจิสเตอร์แล้วจะหยุดสัญญาณที่ป้อนกับแล้วป้อนสัญญาณที่ผิดปกติ (ช่วงเปิดเครื่อง (power up) ไฟเลี้ยงที่ใช้กลิตซ์แวงมา ฯลฯ) เข้าไปยังรีจิสเตอร์แล้วตรวจสอบดูว่าเอาต์พุตของวงจรที่ทดสอบจะยังสามารถให้เอาต์พุตในสถานะถัดไปที่ต้องการได้หรือไม่ การลบข้อมูลแบบพัลส์โหมด (bulk erase mode)

ก่อนการโปรแกรมข้อมูล (pattern) จะต้องมีการลบข้อมูลนี้จะเป็นไปโดยอัตโนมัติจากเครื่องที่ใช้โปรแกรม โดยจะเป็นส่วนหนึ่งของไซเคิลการเขียนข้อมูล ซึ่งใช้เวลาในการลบทั้งหมด 50 นาโนวินาที

### เพาเวอร์อัฟเฟต

หลังจากที่ป้อนไฟเลี้ยงแล้วจะมีสัญญาณไปรีเซตรีจิสเตอร์ทุกตัว เมื่อเวลาผ่านไป ( $t_{RESET}$  สูงสุด 45 us) เอาต์พุต Q ของรีจิสเตอร์ทุกตัวจะถูกตั้งให้เป็น "L" ส่งผลให้เอาต์พุต (ถ้ามีสัญญาณ OE มากกระตุ้นให้ทำงาน) จะมีลอจิกเป็น "H" โดยไม่ขึ้นกับการกำหนดโพลาริตี้ ความสามารถอันนี้จะทำให้การออกแบบวงจรซีควเอนเชียลได้ง่ายขึ้น โดยการกำหนดสถานะช่วงเริ่มต้นของไซเคิลการทำงานให้ปรากฏที่

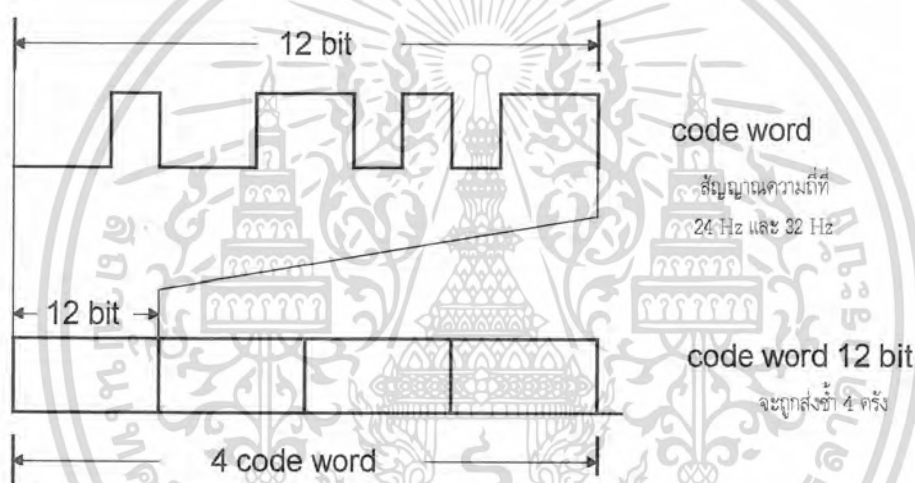
ช่วงเพาเวอร์อัฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 Code

สัญญาณ Code ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นสัญญาณ FSK (frequency shift keying) ความถี่ที่ใช้ คือ  $24 \text{ Hz}$  และ  $32 \text{ Hz}$  มี bit rate เท่ากับ  $16 \text{ bit /dec}$  ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ bit rate เป็น MSK (minimum shift keying) คือ  $f_1 - f_2 = \text{bit rate}/2$  ซึ่งทำให้มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง ในขณะที่สิ้นเปลือง bandwidth น้อย

สัญญาณ Code จะประกอบด้วย 4 code word และแต่ละ code word มี 12 bit ดังแสดงในรูป



รูปที่ 18 แสดง Waveform ของ Code signal

เพื่อลดความผิดพลาด ซึ่งอาจคิดจากการเข้าใจผิดของเครื่องรับที่มองเห็น noise เป็น code signal เราจะใช้วิธีการส่ง code word ลื่นๆ แต่จะส่งซ้ำ 4 ครั้ง ซึ่งการใช้วิธีนี้จะสามารถลดความผิดพลาดได้เท่ากับ การส่ง code word ยาวๆ ตัวเดียว แต่มีข้อดีคือ เวลาที่ใช้ในการ detect จะน้อยกว่า เช่น อาจ detect ได้ตั้งแต่ code word ที่สอง

จำนวนของ code pattern จะขึ้นอยู่กับความยาวของ code ในกรณีนี้เราใช้ code 12 bit ดังนั้นจะมี code pattern ทั้งหมด 4096 ตัว แต่เราจะเลือกใช้เฉพาะ pattern ที่มีคุณสมบัติ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มีจำนวนของ "1" และ "0" เท่ากัน เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดจาก noise
2. เมื่อส่ง code pattern แต่ละตัวอย่างต่อเนื่อง จะต้องไม่มี code pattern ตัวอื่น  
บรรจุอยู่ เพราะเราจะต้องส่ง code pattern แต่ละตัวซ้ำกัน 4 ครั้ง จากคุณสมบัติทั้งสองข้อจะได้ code  
pattern ดังตัวอย่าง

0000	1010	1111
0000	1101	1101
0001	0110	1101
0001	0111	0011
0010	0110	1011



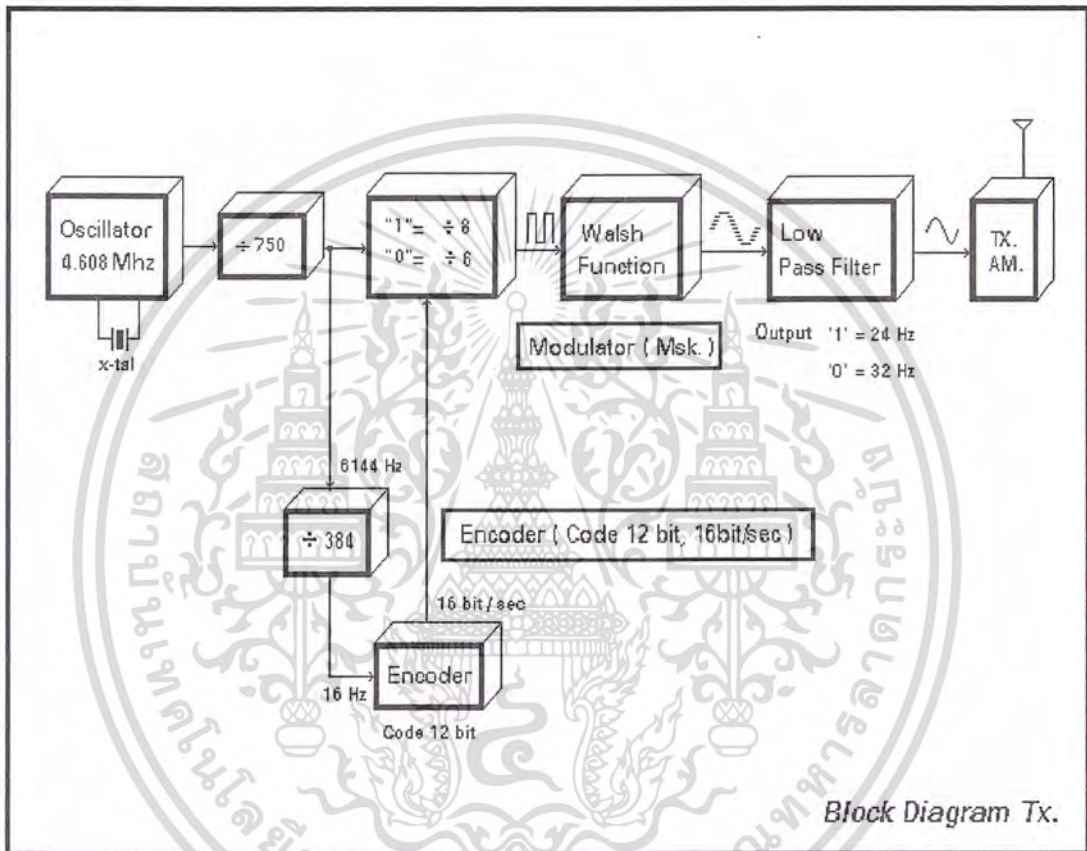
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

## การทำงานของ การส่งข้อมูลด้วยความเร็วต่ำในระบบ AM

(Low bit rate data transmission in AM. boardcasting system)

## 3.1 ภาคส่ง



รูปที่ 19 ผังแสดงการทำงานของวงจร ทางด้านส่ง

จากผังแสดงการทำงานทางด้านส่งของวงจร Low bit rate data transmission in AM. boardcasting system นั้นจะเห็นได้ว่าวงจรจะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญใหญ่ๆ สองส่วนดังนี้ คือ

- ชุด Modulator ซึ่งจะเป็นการ Modulation แบบ Minimum shift keying (MSK.) ส่วนในรายละเอียดของ MSK. นั้นได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว

- ชุดของวงจรเข้ารหัส ( Encoder ) รหัสนี้จะเป็นรหัส จำนวน 12 บิต โดยความเร็วในการส่งรหัสจะเท่ากับ 16 บิตต่อวินาทีรายละเอียดของการกำหนดรหัสนั้นได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

ฉะนั้นจะขอกกล่าวถึงรายละเอียดของวงจรแต่ละชุดว่าทำงานกันอย่างไรทำไมจึงต้องให้ทำงานเช่น

นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของวงจร Modulator จะประกอบด้วย

- วงจรผลิตความถี่โดยใช้แร่บังคับความถี่ 4608 เมกะเฮิร์ตซ์
- วงจรหาร 750
- วงจรหาร 6 เมื่อรับสัญญาณเข้า = " 0 "
- วงจรหาร 8 เมื่อรับสัญญาณเข้า = " 1 "
- วงจร Walsh function
- วงจรกรองความถี่ต่ำ

ส่วนประกอบของวงจร วงจรเข้ารหัส ( Encoder) จะประกอบด้วย

- วงจรหาร 384
- วงจรเข้ารหัส



การออกแบบใช้วงจรผลิตความถี่โดยใช้แรมป์คัมความถี่ในย่านความถี่ 4608 เมกเฮิรตซ์ สาเหตุที่ต้องใช้แรมป์คัมความถี่ก็เพราะว่าการทำงานของวงจรมันต้องการความถี่ที่มีความเที่ยงตรงสูงเพื่อนำไปควบคุมการทำงานในส่วนต่างๆ ของวงจรความถี่ที่ต้องการจริง ๆ คือ

- ความถี่ 768 เฮิรตซ์ สำหรับผลิตสัญญาณ ไซน์เวฟ ( Sine Wave ) ความถี่ 24 เฮิรตซ์

- ความถี่ 1024 เฮิรตซ์ สำหรับผลิตสัญญาณ ไซน์เวฟ ( Sine Wave ) ความถี่ 32 เฮิรตซ์

เพื่อความสะดวกในการสร้างวงจจึงต้องหาความถี่ร่วมกันแล้วนำมาหารแล้วให้ได้ความถี่ 768 เฮิรตซ์ และ ความถี่ 1024 เฮิรตซ์ ตามต้องการ จากนั้นเองจะได้ความถี่ร่วมคือ 3072 เฮิรตซ์ เป็นการยากมากที่จะหาข้อแรมป์คัมความถี่ ความถี่ 3072 เฮิรตซ์ และจะยุ่งยากมากสำหรับการสร้างวงจรสังเคราะห์ความถี่ (Synthesizer ) ฉะนั้นจึงหาแรที่ใช้อยู่ที่ความถี่ ที่มีความถี่ที่สูงกว่าแล้วนำมาหารให้ได้ความถี่ที่ต้องการคือ ความถี่ 3072 เฮิรตซ์ ข้อดีอีกอย่างหนึ่งในการหาวิธีการนี้ก็คือนำความถี่ที่มีความเที่ยงตรงสูง

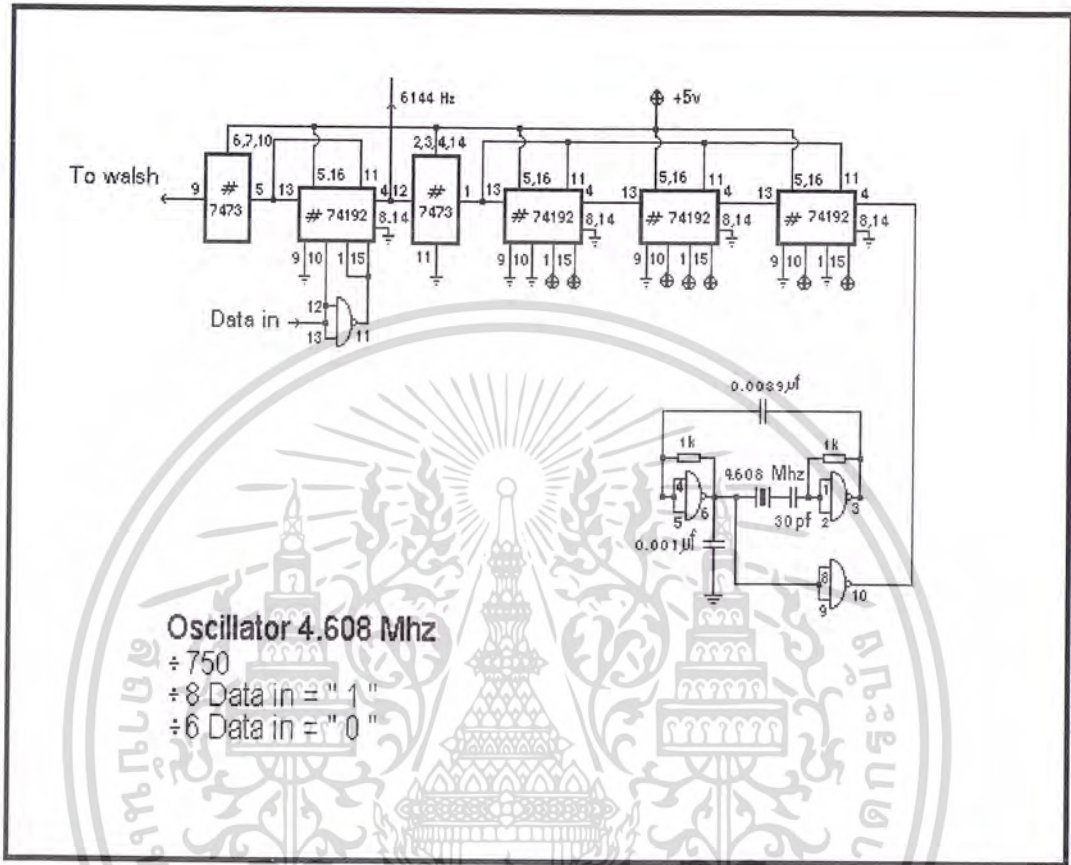
การทำงานของวงจรมันใช้ IC เบอร์ 74192 (Synchronous decade up/down counter ) แต่นำมาใช้ในทำหน้าที่เป็น count down ส่วนรายละเอียดของวงจรแสดงดังรูปที่ 20

สำหรับการใช้วงจร ทาร 750 , ทาร 8 เมื่อมีสัญญาณ เข้าเป็น " 1 " และ ทาร 6 เมื่อสัญญาณ เข้าเป็น " 0 " ความถี่ที่ต้องการคือ 768 เฮิรตซ์ เมื่อสัญญาณเข้าเป็น " 1 " และ ความถี่ 1024 เฮิรตซ์ เมื่อสัญญาณเข้าเป็น " 0 " แต่ความถี่ที่เกิดจากวงจรสร้างคือ ความถี่ 4608 เฮิรตซ์ ฉะนั้นจึงต้อง เมื่อสัญญาณเข้าเป็น " 1 " ทำการหารดังนี้

4608 เฮิรตซ์ หารด้วย 750 และหารด้วย 8 จะได้ความถี่ 768 เฮิรตซ์

เมื่อสัญญาณเข้าเป็น " 0 " ทำการหารดังนี้

4608 เฮิรตซ์ หารด้วย 750 และหารด้วย 6 จะได้ความถี่ 1024 เฮิรตซ์



รูปที่ 20 วงจรผลิตสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 4608 MHz

ส่วนการหารนั้นก็ใช้หลักการการ count down ของ ic เบอร์ 74192 รายละเอียดดังรูปที่ 20 วงจรหาร 750 , วงจรหาร ๘ เมื่อสัญญาณเข้าเป็น " 1 " และวงจรหาร 1 เมื่อสัญญาณเข้าเป็น " 0 "

**วงจรถ่าย Walsh function**

สำหรับหน้าที่ของวงจรถ่าย Walsh function นั้นมีหน้าที่แปลงสัญญาณจากสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ( Squar wave ) ให้เป็นสัญญาณไซน์เวฟ ( Sine wave ) ส่วนความถี่ของสัญญาณไซน์เวฟนั้นจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนให้วงจรถ่าย Walsh function

**ตัวอย่าง**

ถ้าต้องการความถี่ไซน์เวฟความถี่ 24 เฮิรตซ์ ก็ต้องป้อนสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 768 เฮิรตซ์ และเช่นเดียวกันถ้าต้องการถ้าต้องการความถี่ไซน์เวฟความถี่ 32 เฮิรตซ์ ก็ต้องป้อนสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 1024 เฮิรตซ์ เป็นต้นสัญญาณที่ออกจาก Walsh function นั้นจะได้แสดงดังรูปที่ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 แสดงรูปสัญญาณที่ออกจากวงจร Walsh function

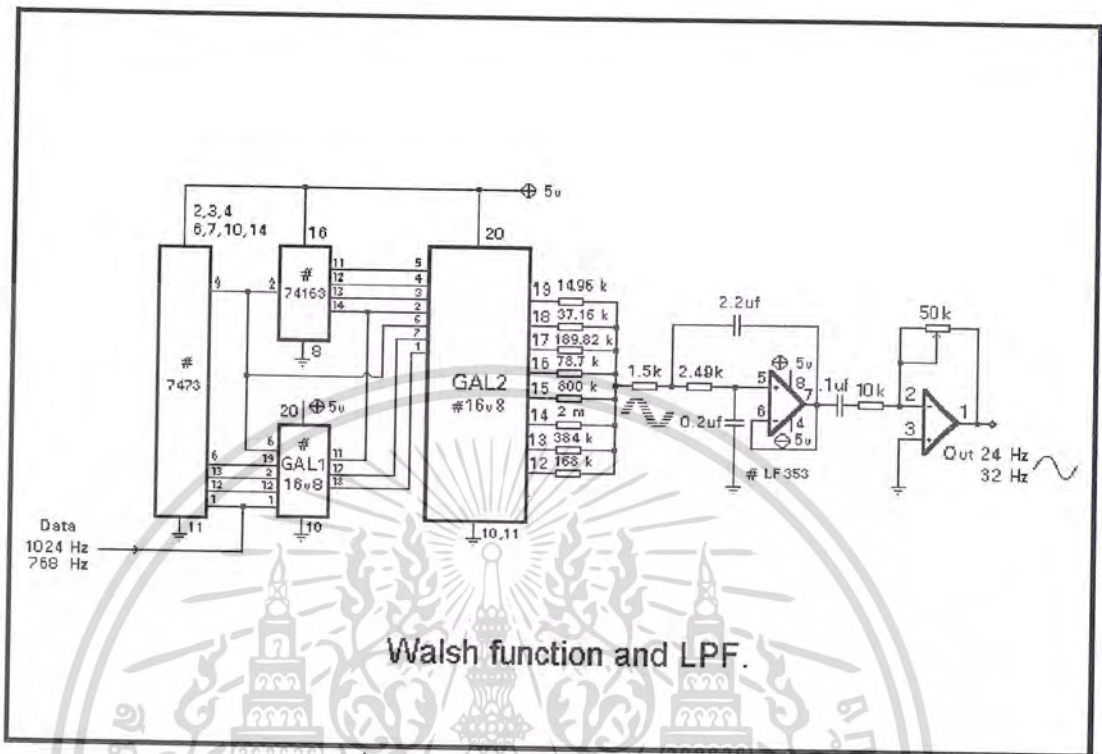
วงจรกรองให้ความถี่ต่ำผ่าน ( Low pass filter )

จากรูปที่ 21 เราจะเห็นว่ารูปสัญญาณไซน์เวฟที่ออกมาจากวงจร Walsh function นั้นไม่ใช่สัญญาณที่เป็นไซน์เวฟที่ดี เพื่อให้ได้สัญญาณไซน์เวฟที่ดีควรนำสัญญาณที่ได้นั้นมาผ่านวงจรกรองให้ความถี่ต่ำผ่าน แล้วจะได้สัญญาณไซน์เวฟดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 21 โดยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะยอมให้ความถี่ต่ำกว่าความถี่ 50 เฮิรตซ์ ผ่าน



รูปที่ 21 แสดงสัญญาณไซน์เวฟหลังจากผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ

ส่วนวงจรของ Walsh function นั้นได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 22



รูปที่ 23 แสดงวงจร Walsh function

จากรูปที่ 23 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ไม่มากนักและความสลับซับซ้อนก็น้อยที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากอุปกรณ์ที่มีชื่อว่า **Generic Array Logic (GAL)** ซึ่งรายละเอียดของ GAL นั้นได้กล่าวรายละเอียดไว้ข้างต้นแล้ว

วงจรเข้ารหัส วงจรเข้ารหัสนี้จะสร้างรหัสจำนวน 12 บิต โดยมีความเร็วของการส่งรหัสเท่ากับ 16 บิตต่อวินาที วงจรเข้ารหัสนี้มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ

- วงจรหาร 384 วงจรนี้จะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของรหัสที่จะทำการส่ง
- วงจรสร้างรหัส จะสร้างรหัสตามที่กำหนดส่วนข้อกำหนดของการสร้างรหัสได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

ในที่นี้จะใช้รหัสคือ 0000 1010 1111

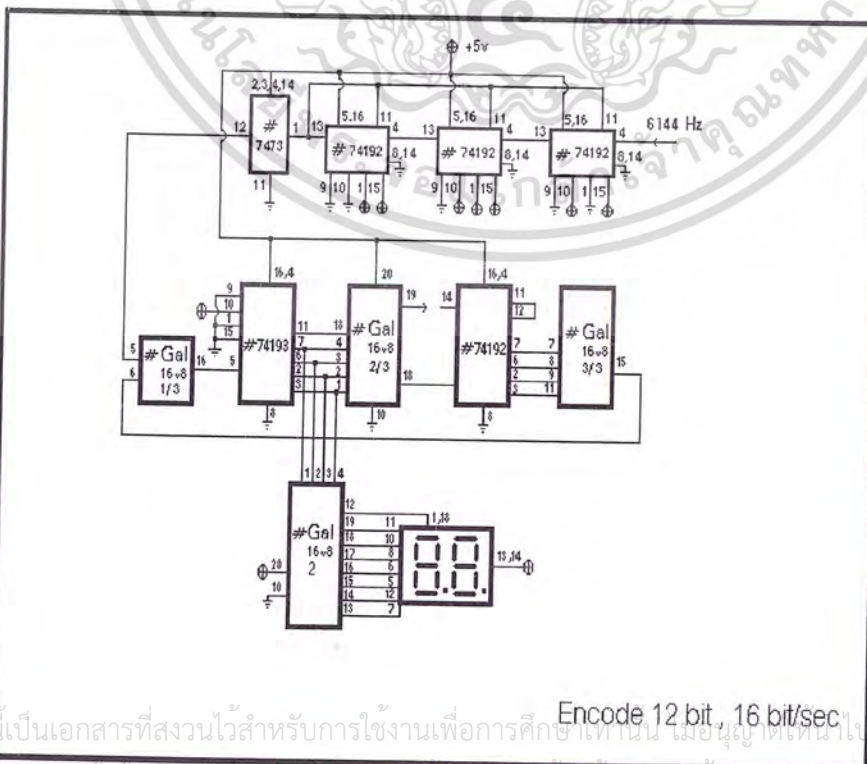
ความไวที่ทำการส่งเท่ากับ 16 บิตต่อวินาทีแต่รหัสที่ทำการส่ง ส่งเพียง 12 บิต ฉะนั้นจะใช้เวลาในการส่งรหัสนี้ 1 ครั้ง เท่ากับ 75/100 วินาที แต่เพื่อความแน่นอนจึงทำการส่งรหัสไปเป็นจำนวน 4 ครั้ง เวลาที่ใช้ไปจึงเป็น 3 วินาที หมายความว่าทางด้านรับจะรับได้เวลาจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 วินาที

การสร้างรหัสนั้นอาศัยการนับขึ้น (Count up) ของไอซีเบอร์ 74193 (Synchronous 4 bit up/down counter) โดยตัวควบคุมความเร็วในการส่งจะอยู่กับวงจรหาร 384 ส่วนการควบคุมว่าจะทำการ

ส่งไปทีละครั้งนั้นจะใช้ไอซีเบอร์ 74192 (Synchronous decade up/down counter) เป็นตัวควบคุม การสลับรหัสนั้นแสดงดังตาราง

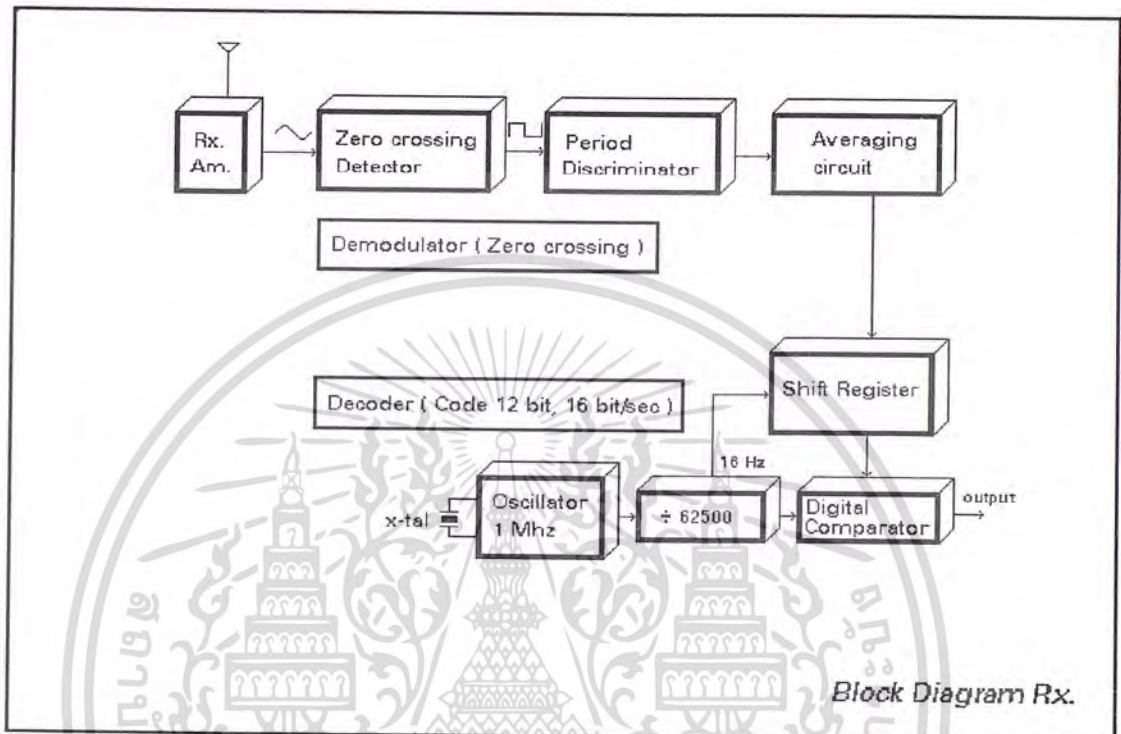
เลขฐานสิบ	D	C	B	A	รหัสน
4	0	1	0	0	0
5	0	1	0	1	0
6	0	1	1	0	0
7	0	1	1	1	0
8	1	0	0	0	1
9	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	1
11	1	0	1	1	0
12	1	1	0	0	1
13	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	1
15	1	1	1	1	1

ตาราง 5 แสดงลักษณะการสร้างรหัสน 12 บิต



รูปที่ 24 แสดงวงจรรวมเข้ารหัสน 12 บิต

### 3.2 วงจรทางด้านรับ



รูปที่ 26 แสดงผังการทำงานของวงจรทางด้านรับ

จากผังการทำงานของวงจรทางด้านรับตามรูปที่ 26 จะเห็นได้ว่าวงจรทางด้านรับก็ประกอบด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนเช่นเดียวกับกับทางด้านส่ง ดังนี้

- วงจร Demodulator สัญญาณของ Minimum shift keying ( MSK )

- วงจรถอดรหัส ( Decoder ) ซึ่งจะถอดรหัสจำนวน 12 บิต ว่ารหัสที่ส่งมานั้นถูกต้องหรือไม่ ถ้ารหัสที่ส่งมาถูกต้องส่วนแสดงผลทางด้านรับจึงจะทำงาน

ส่วนประกอบของวงจร Demodulator นั้นจะประกอบไปด้วย

- วงจรตรวจจับสัญญาณตัดศูนย์ ( Zero crossing detector )

- วงจรตรวจจับเวลา ( Period discriminator )

- วงจรหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าและวงจรเปรียบเทียบ

ส่วนประกอบของวงจรถอดรหัสนั้นจะประกอบด้วย

- วงจรผลิตความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ โดยควบคุมโดยแรงบังคับความถี่

- วงจรหาร 625000

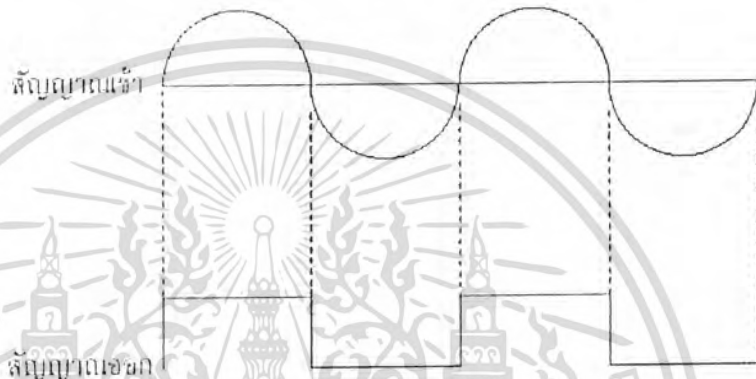
- วงจรเปลี่ยนข้อมูลรับเข้ามาจากอนุกรมให้เป็นขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรต่าง ๆ

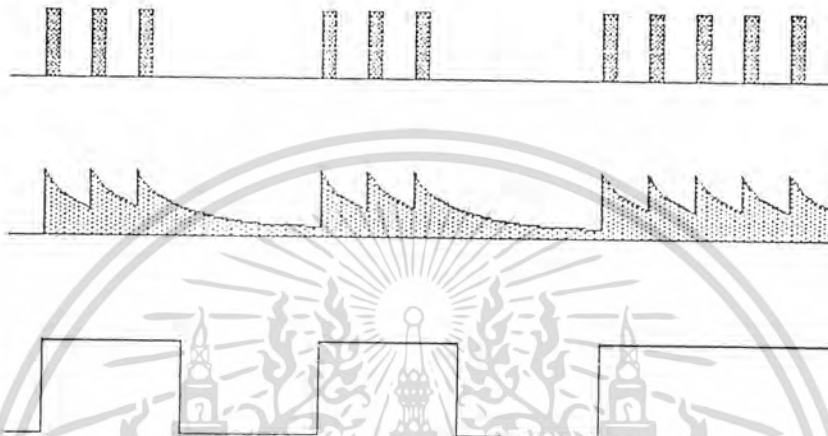
- วงจรตรวจจับสัญญาณตัดศูนย์ ( Zero crossing detector ) สามารถอธิบายให้เข้าใจง่าย ๆ ดังรูป 27



รูปที่ 27 แสดงรูปสัญญาณก่อน - หลัง วงจรตรวจจับสัญญาณตัดศูนย์

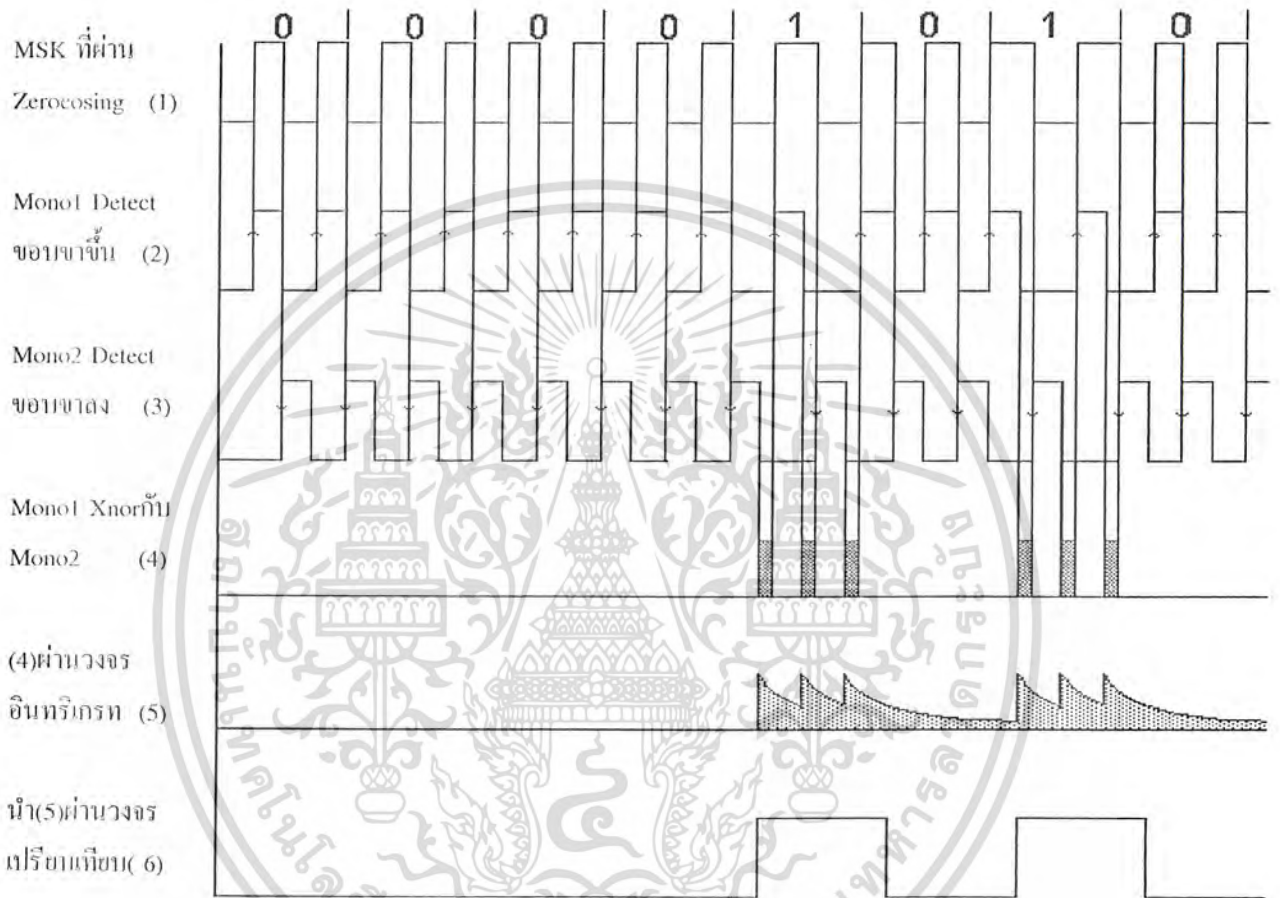
วงจรตรวจจับเวลา ( Period discriminator ) จริงๆ แล้วมีอยู่หลายวิธีในการตรวจจับเวลา เช่น วิธีกรองความถี่ วิธีการของ PLL ฯลฯ แต่ในที่นี้จะใช้หลักการของการหน่วงเวลาโดยอาศัยการทำงานของ ไอซีเบอร์ 74123 เป็นหลัก

- วงจร วงจรหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าและวงจรเปรียบเทียบวงจรนี้จะทำงานต่อจากวงจรตรวจจับเวลาสัญญาณที่ออกจากวงจรนี้จะสัญญาณของข้อมูลที่ส่งมาซึ่งในที่นี้คือรหัส 12 บิตลักษณะของการทำงานอธิบายได้จากรูปสัญญาณ รูปที่ 28



รูปที่ 28 แสดงสัญญาณเมื่อผ่านวงจรถ่ายและวงจรถ่ายเทียบ  
ส่วนสัญญาณของการทำงานทั้งหมดแสดงให้เห็นในรูปที่ 29

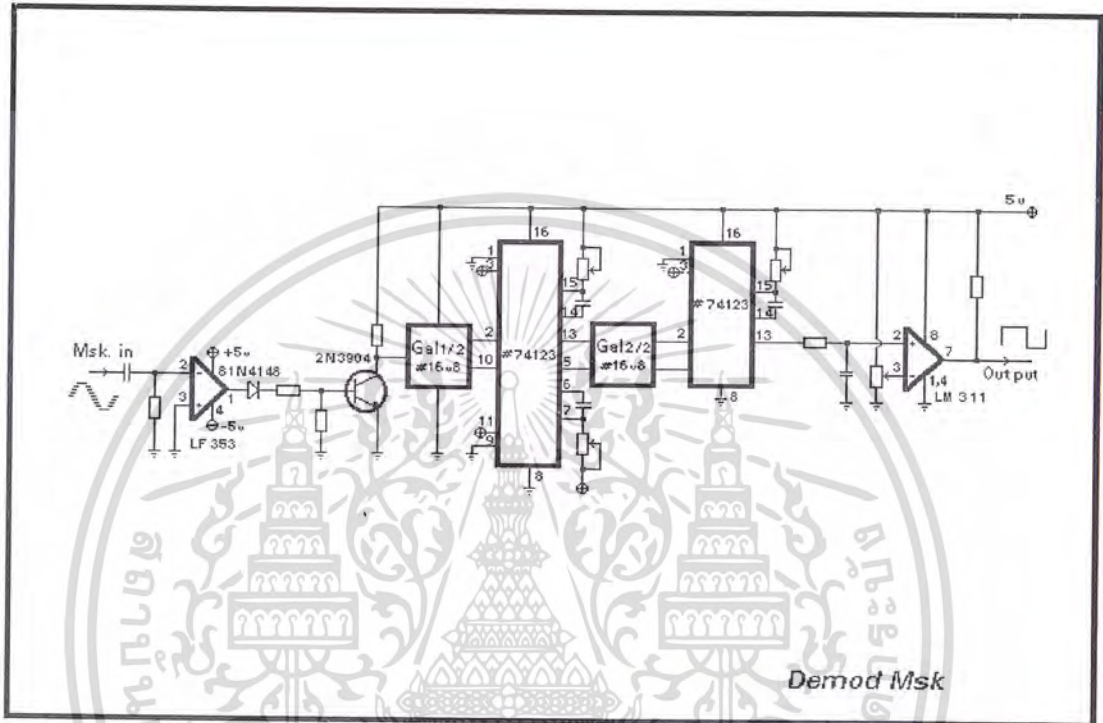
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 29 แสดงถึงสัญญาณของการ Demodulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนวงจรของวงจร Demodulation นั้น แสดงดังรูปที่ 30

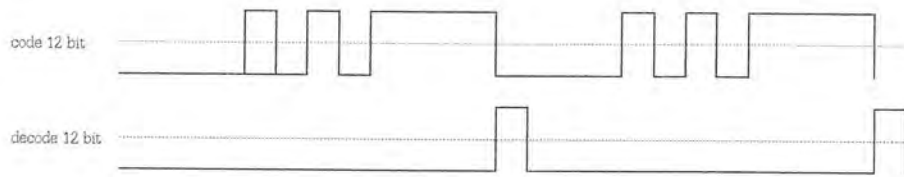


รูปที่ 30 ดงวงจร Demodulator ของวงจร MSK.

วงจรถอดรหัส วงจรถอดรหัสนี้จะถอดรหัสจำนวน 12 บิตความเร็ว 16 บิตต่อวินาที ส่วนประกอบของวงจรนี้จะประกอบไปด้วย

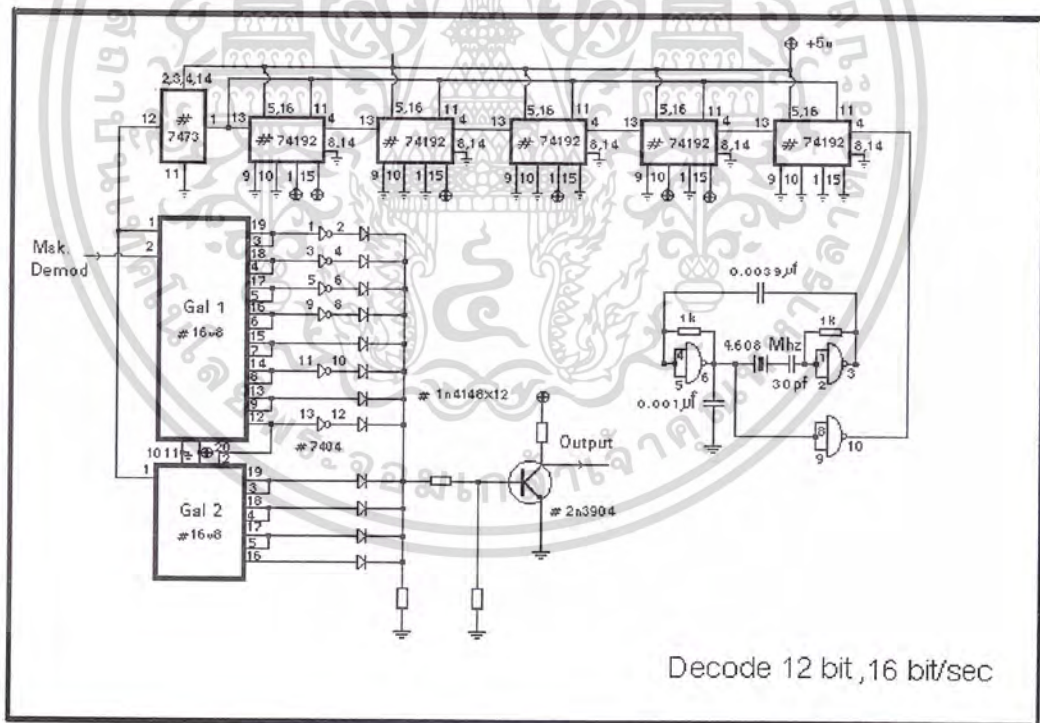
- วงจรผลิตความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ และ วงจรหาร 625000 สองวงจรนี้ทำไว้ก็เพื่อผลิตสัญญาณไปควบคุมให้ทางได้รับ รับสัญญาณให้ไวเท่าที่ทางด้านส่ง ส่งมา
- วงจรเปลี่ยนข้อมูลรับเข้ามาจากอนุกรมให้เป็นขนานวงจรนี้จะใช้การทำงานของ D F/F แต่ถ้าใช้ D F/F โดยตรงนั้นก็จะเป็นที่ยุ่ยากเพราะว่าต้องใช้เป็นจำนวนมากเพราะฉะนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้ GAL. แทนจึงลดความยุ่งยากไปได้มากดังจะเห็นได้จากวงจรรูปที่ 32 อีกทั้งเป็นการประหยัดพลังงานลดค่าใช้จ่าย
- วงจรเปรียบเทียบรหัสจำนวน 12 บิต เป็นวงจรที่ตรวจสอบความถูกต้องของรหัสที่ส่งเข้ามาโดยรหัสนั้นทางด้านส่งและทางด้านรับต้องทำการตกลงกันก่อนว่าจะใช้รหัสอย่างไรในที่นี้จะใช้รหัสคือ 0000 1010 1111 เป็นจำนวน 12 บิต ดังรูปที่ 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 แสดงรหัสและแสดงรหัสที่ถูกตรวจสอบได้

ส่วนวงจรตรวจสอบความถูกต้องของรหัสนั้นแสดงดังวงจรรูปที่ 32

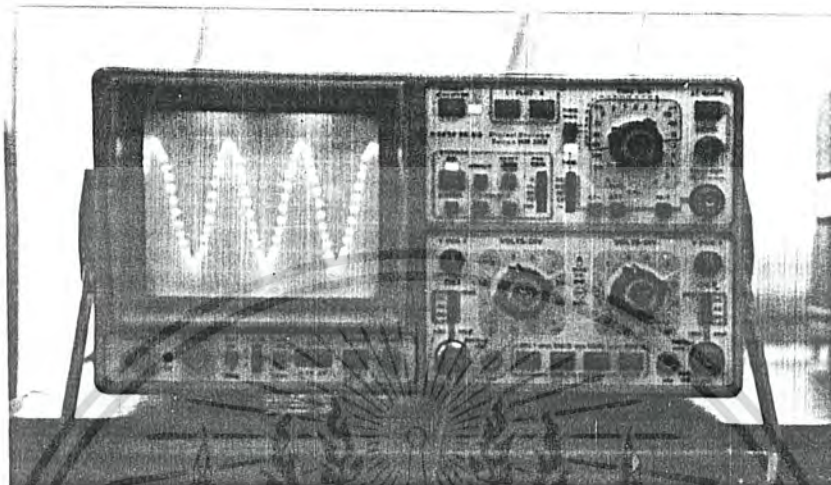


Decode 12 bit , 16 bit/sec

รูปที่ 30 แสดงวงจรตรวจสอบความถูกต้องของรหัส

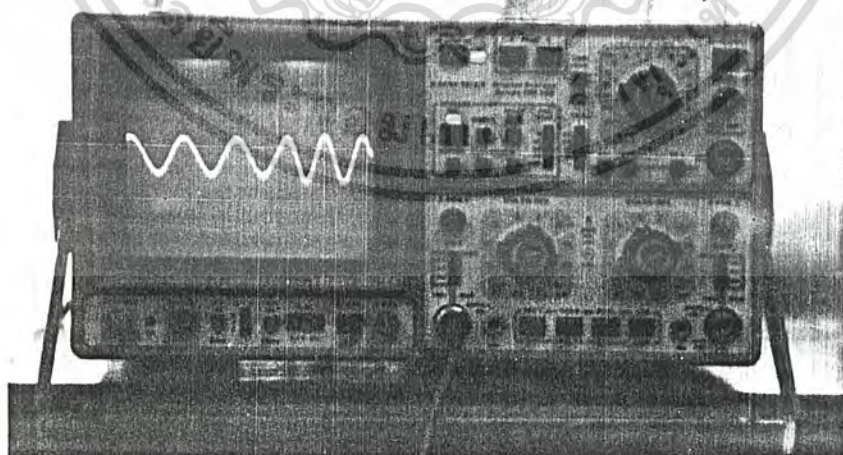
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง



รูปที่ 83 แสดงสัญญาณหลังจากผ่านวงจร walsh function

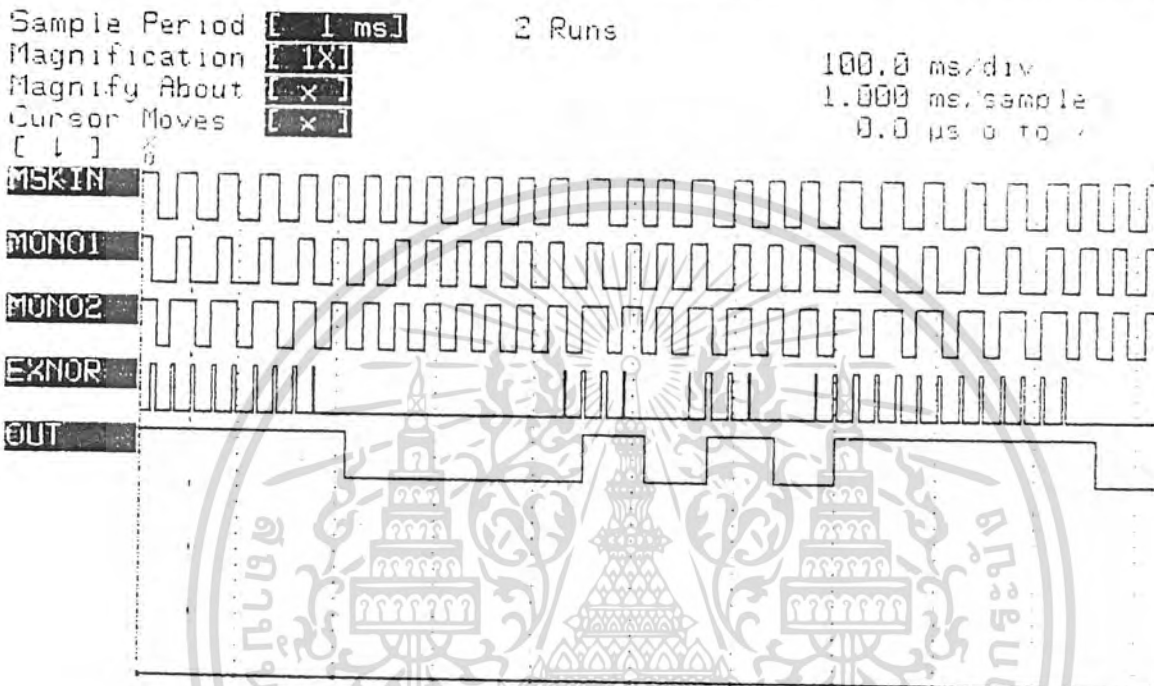
จากรูปแสดงผลการทดลอง การนำสัญญาณมาสัญญาณผ่านวงจร walsh function ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยน square wave ให้เป็นสัญญาณ sine wave



รูปที่ 84 แสดงสัญญาณการเปลี่ยนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Timing Waveform Diagram-----

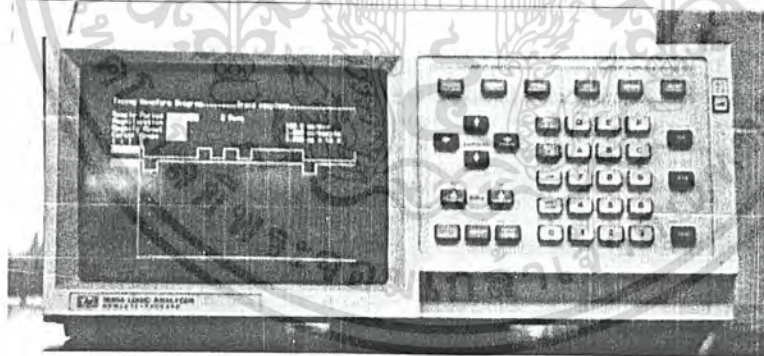
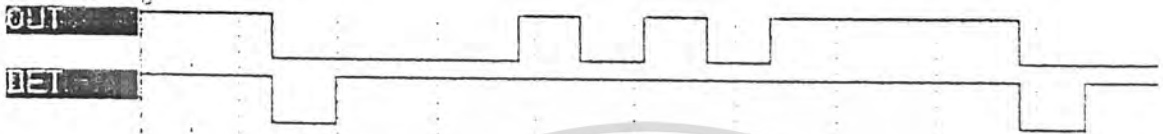


รูปที่ 35 แสดงการ decode 12bit (000010101111)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Timing Waveform Diagram-----INSERT to add traces-----

Sample Period [ 1 ms ]      3 Runs  
 Magnification [ 1X ]      100.0 ms/div  
 Magnify About [ X ]      1.000 ms/sample  
 Cursor Moves [ X ]      0.0  $\mu$ s to

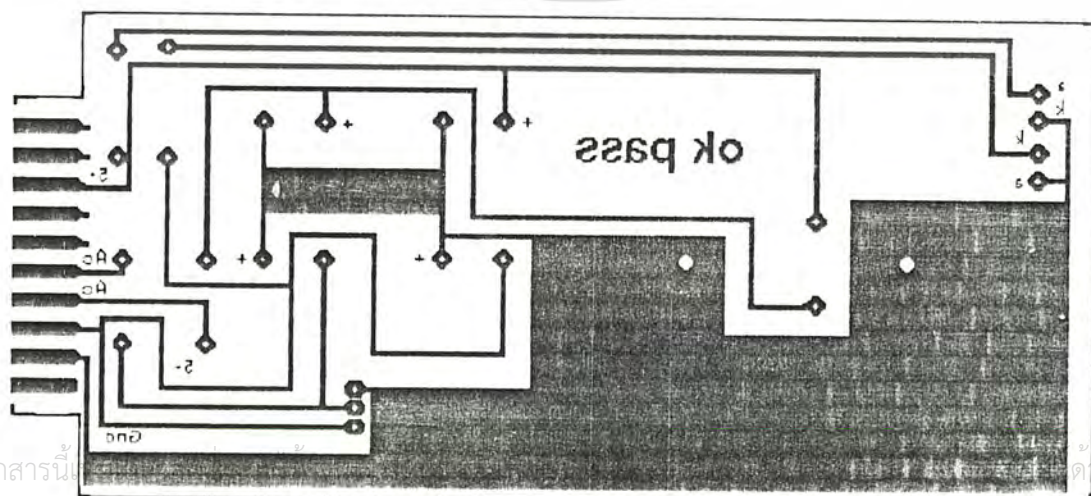
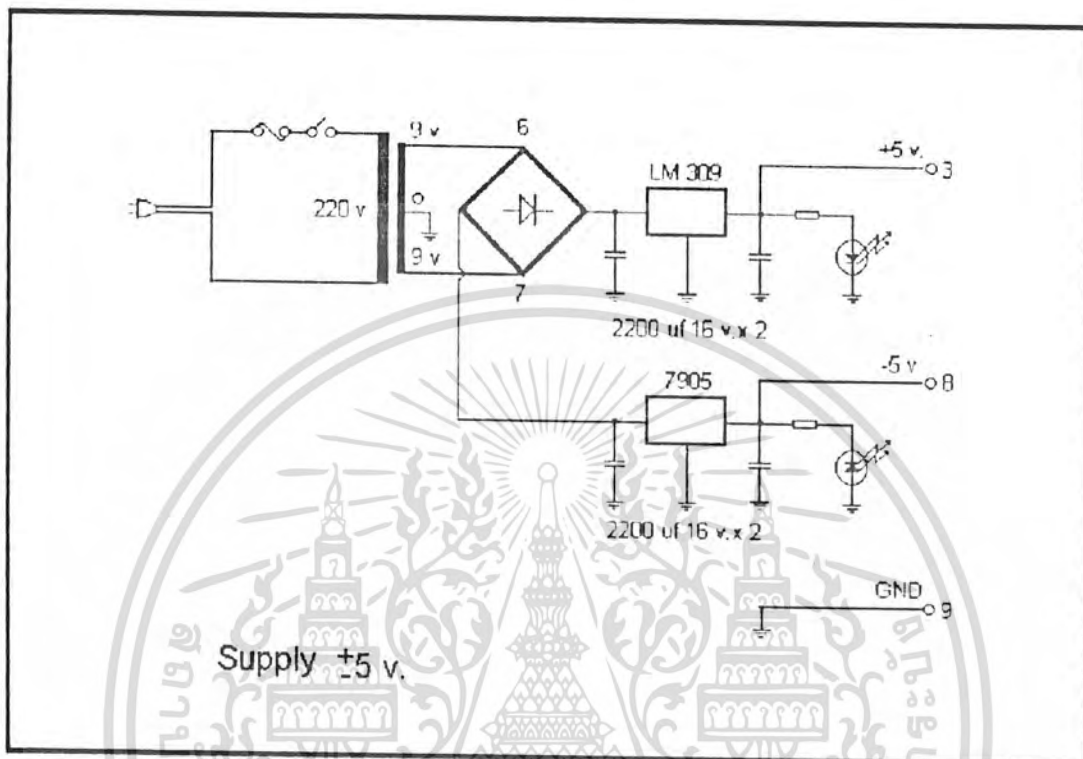


### รูปที่ 36 แสดงการ Demod รหัส

จากรูป MSK IN, MONO1, MONO2 ก็อกรรรมวิธีการ Demod สัญญาณ MSK โดยที่นำมา EXHIBIT  
 จึงจะได้สัญญาณ OUT ออกมาเป็นการ Demod MSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

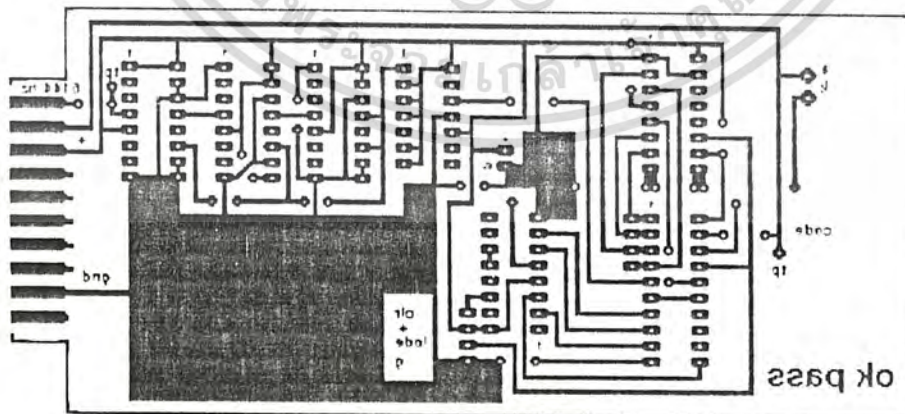
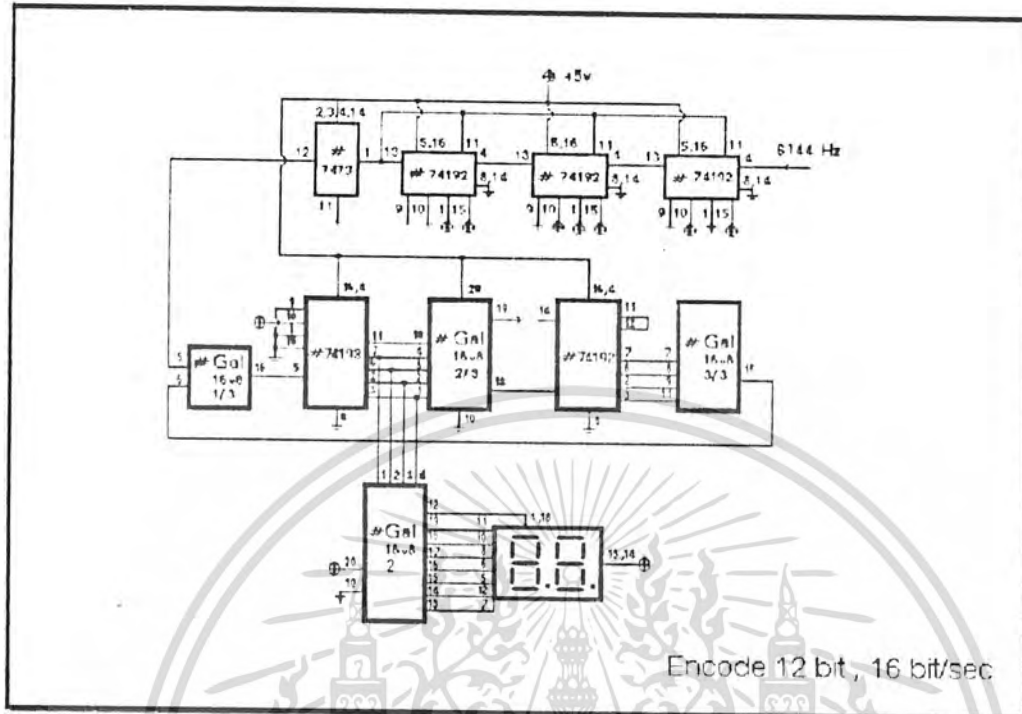
ภาคผนวก



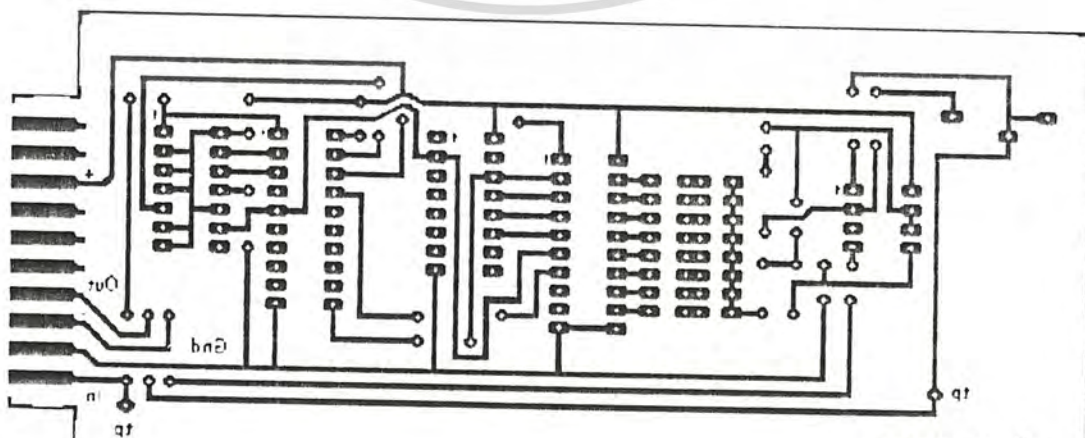
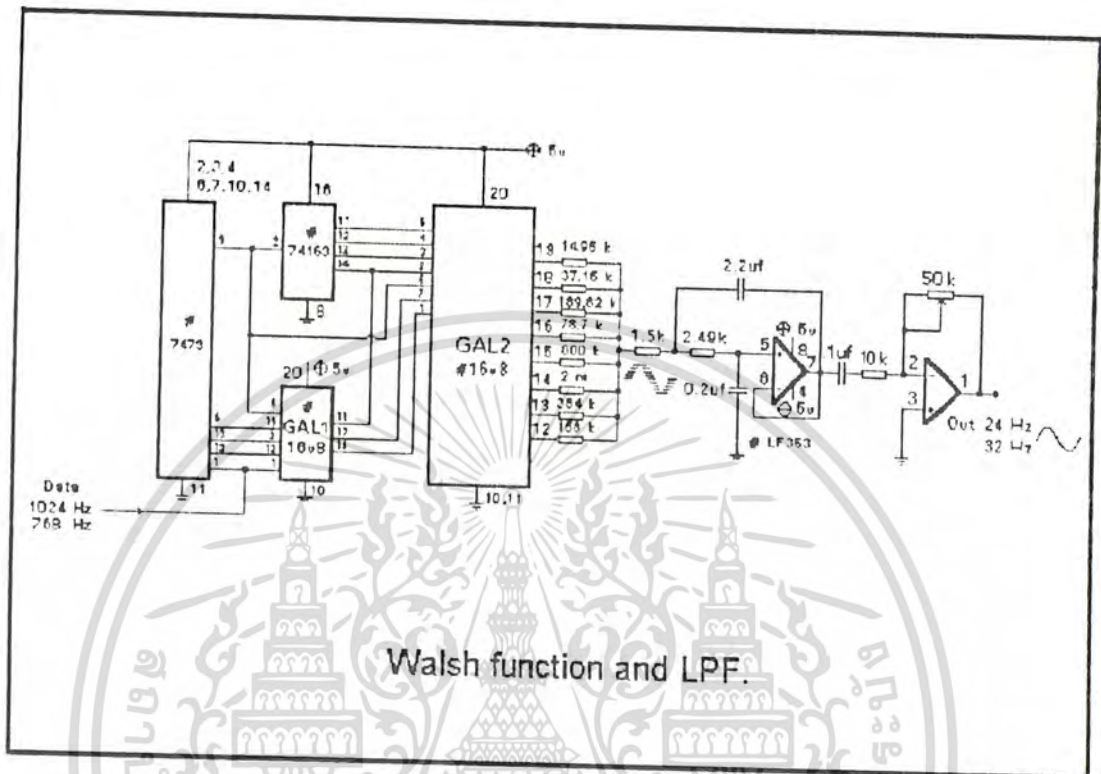
เอกสารนี้

ได้รับการค่า

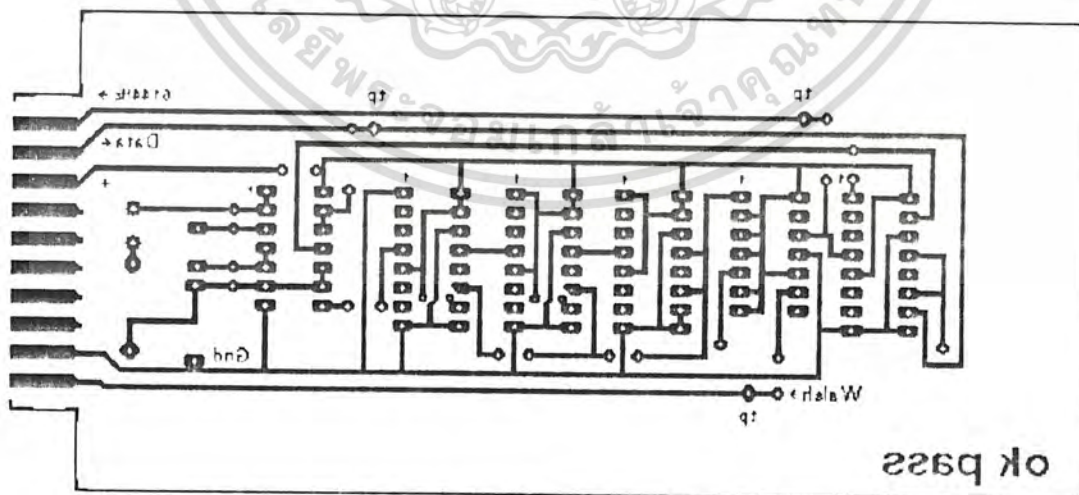
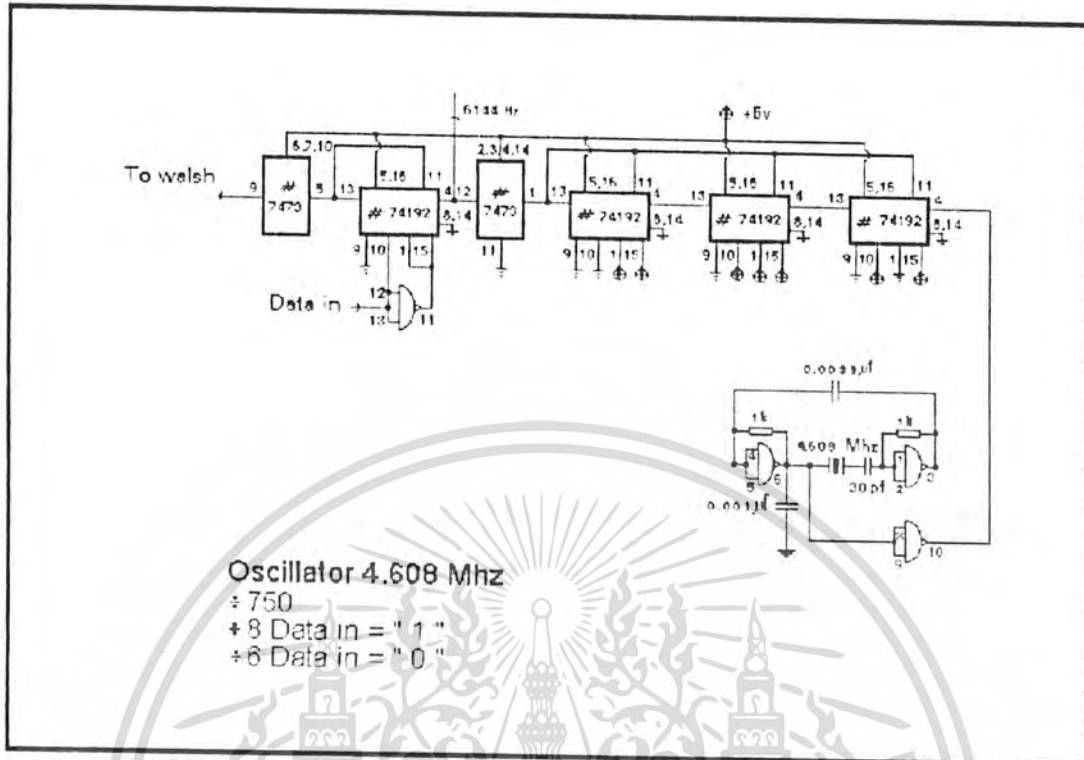
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



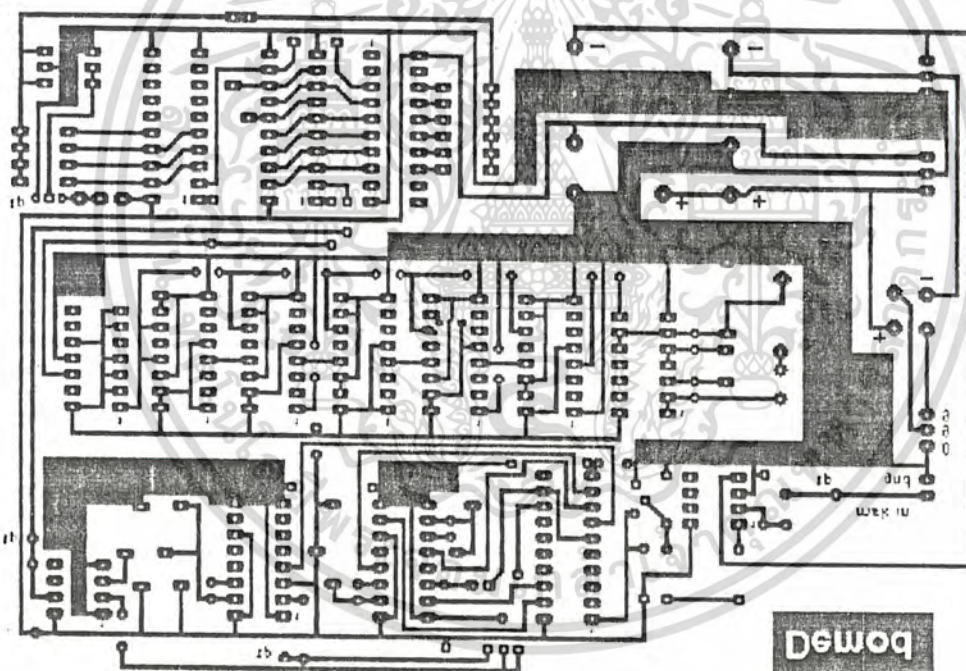
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



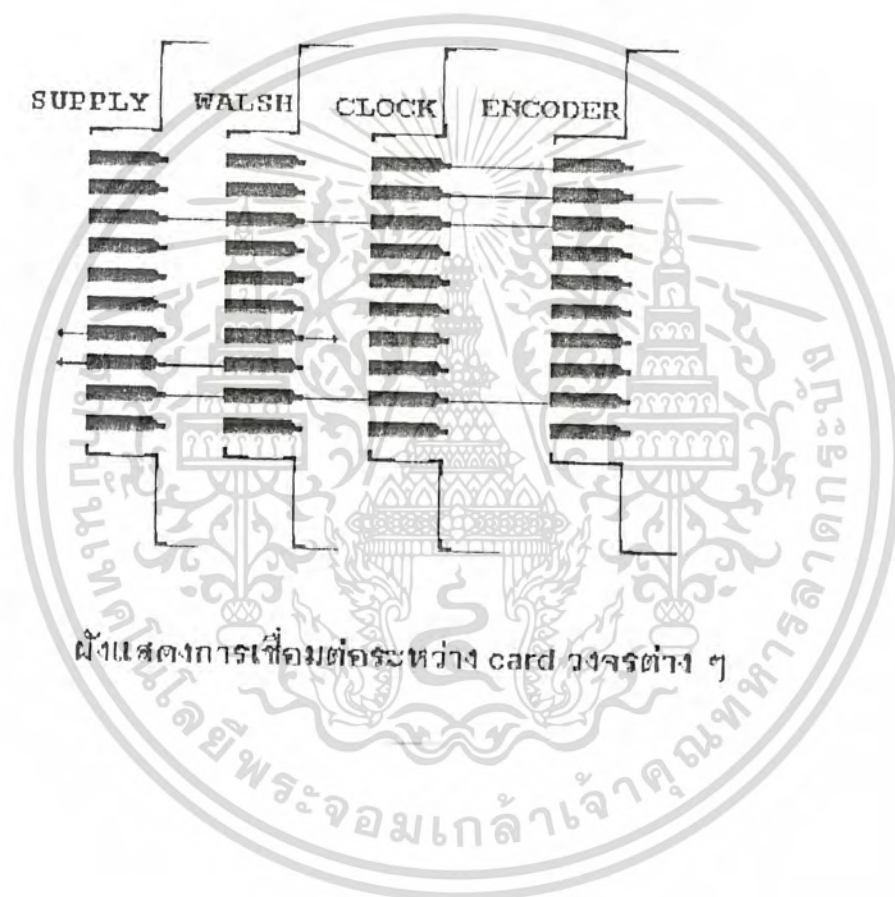
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

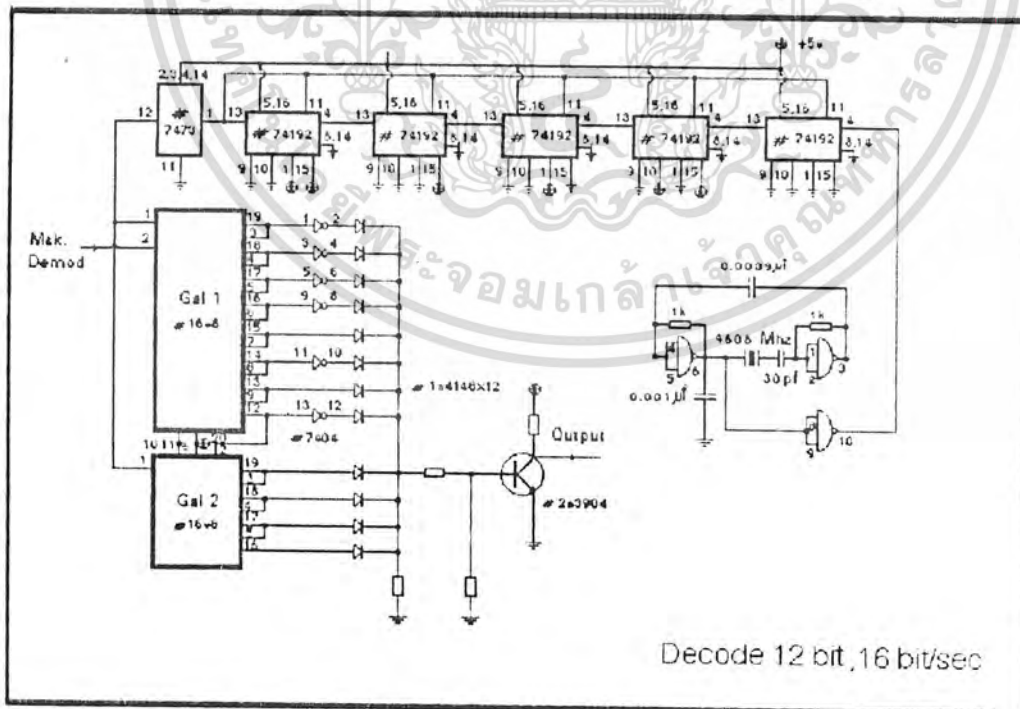
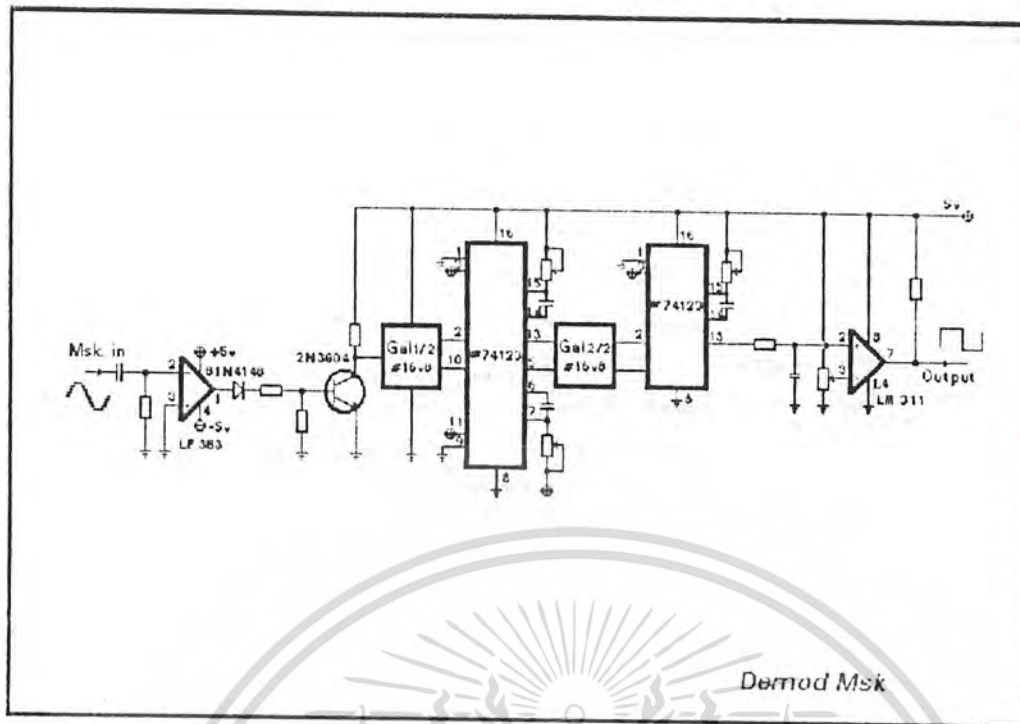


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผังแสดงการเชื่อมต่อระหว่าง card วงจรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PAL16LS

IC1

COUNTER GATES

KMITL

A	B	C	D	NC	NC	NC	NC	NC	GND
NC	X	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1	VCC

$$\begin{aligned} /F1 &= /B*/D \\ &+ /A* C \\ &+ B* D \\ &+ A*/C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} /F2 &= /A* C* D \\ &+ /C*/D \\ &+ A*/C \\ &+ A*/D \\ &+ /B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} /F3 &= /B*/C \\ &+ /A* B \\ &+ A* C \\ &+ D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} /F4 &= /A*/B* C \\ &+ /A* C*/D \\ &+ B*/C* D \\ &+ A* B* D \\ &+ /B*/D \\ &+ A*/C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} /F5 &= /A* C*/D \\ &+ A*/C*/D \\ &+ /B*/D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} /F6 &= /B*/C*/D \\ &+ /A* B*/C \\ &+ B* C*/D \\ &+ A*/B*/C \\ &+ A* C*/D \\ &+ A* B* C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} /F7 &= /A*/B* C \\ &+ B*/C \\ &+ B*/D \\ &+ A*/C \\ &+ A* B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} /X &= A* C \\ &+ A* B \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

PAL16R8
IC3
WALSH - FUNCTION GENERATOR
KM1TL
*D2224*
G0*F0*
L0000 01111111111111111111111111111111*
L0256 01110111101111111111111111111111*
L0288 01111011011111111111111111111111*
L0320 10110111011111111111111111111111*
L0352 10111011101111111111111111111111*
L0512 01111110111101111111111111111111*
L0544 01111111011101111111111111111111*
L0576 10111111011101111111111111111111*
L0608 10111111011101111111111111111111*
L0768 01110111111101111111111111111111*
L0800 01111011111101111111111111111111*
L0832 10110111111101111111111111111111*
L0864 10111011111101111111111111111111*
L1024 10111111111111111101111111111111*
L1056 01111111111111111111110111111111*
L1280 01110111011111111111110111111111*
L1312 01110111101111111111111011111111*
L1344 01111011101111111111111101111111*
L1376 01111011101111111111111101111111*
L1408 10111011101111111111111101111111*
L1440 10111011101111111111111101111111*
L1472 10110111101111111111111101111111*
L1504 10110111101111111111111101111111*
L1536 01111111011111111101111111111111*
L1568 01111111011111111101111111111111*
L1600 10111111101111111101111111111111*
L1632 10111111011111111101111111111111*
L1792 01110111111111111101111111111111*
L1824 01111011111111111101111111111111*
L1856 10110111111111111101111111111111*
L1888 10111011111111111101111111111111*
L2048 11111010*
L2056 000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000*
L2120 00000000*
L2128 111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111*
L2192 01*
C779C*
1D84

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

PAL16RS
IC3
WALSH - FUNCTION GENERATOR
KMITL
CLK /A /B /C /D /E /F NC NC GND
/OC /QS /Q7 /Q6 /Q5 /Q4 /Q3 /Q2 /Q1 VCC

Q1 := /A ; Wal(1,0)

Q2 := /A*/B* C ; /Wal(5,0)
      + /A* B*/C
      + A*/B*/C
      + A* B* C

Q3 := /A*/C* D ; /Wal(9,0)
      + /A* C*/D
      + A*/C*/D
      + A* C* D

Q4 := /A*/B* D ; /Wal(13,0)
      + /A* B*/D
      + A*/B*/D
      + A* B* D

Q5 := /F*A ; Wal(17,0)
      + F*/A

Q6 := /A*/B*/C*/F ; Wal(21,0)
      + /A*/B* C* F
      + /A* B*/C* F
      + /A* B* C*/F
      + A* B*/C*/F
      + A* B* C* F
      + A*/B*/C* F
      + A*/B* C*/F

Q7 := /A*/C*/E ; Wal(25,0)
      + /A* C* E
      + A* C*/E
      + A*/C* E

QS := /A*/B* E ; Wal(29,0)
      + /A* B*/E
      + A*/B*/E
      + A* B* E

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







## สรุป

จากการทดลองส่งรหัส 12 บิต โดยใช้ระหว่างทางด้าน ส่ง - รับ ปรากฏว่าทางด้านรับพร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของรหัสได้คิดเป็นร้อยละ 90 ของรหัสที่ทำการส่งมา ความผิดพลาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรสำคัญๆ ของทางด้าน รับ - ส่ง เป็นสาเหตุของความผิดพลาดของรหัสที่ได้วิธีแก้ไขข้อบกพร่องนี้ คือ ควรทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจรสำคัญๆ ของทางด้าน รับ - ส่ง ให้มีคุณภาพดังนี้

1. ทางด้านส่ง ควรดูแลคุณภาพของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจร WALSH FUNCTION วงจร LPF และวงจรขยายหลังจากวงจร WALSH FUNCTION
2. ทางด้านรับ ควรดูแลคุณภาพของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจร LPF, ZERO CROSSING วงจร FREQUENCY DISCRIMINATOR

ส่วนการทดลองการส่งรหัส โดยใช้เครื่องส่ง - รับวิทยุ สำหรับการเชื่อมต่อนั้น ผลคือไม่ประสบความสำเร็จ คือ จากการทดสอบส่งสัญญาณ Sinewave ความถี่ 24 Hz และ 32 Hz โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ ผลปรากฏทางด้านรับไม่สามารถรับสัญญาณ SINE WAVE 24 Hz และ 32 Hz จากเครื่องกำเนิดสัญญาณได้ การแก้ไขคือปรับปรุงเครื่องรับวิทยุให้รับสัญญาณ Sine wave ความถี่ 24 Hz และ 32 Hz ที่ส่งมาจากเครื่องให้ได้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการปริญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ส่วนหนึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก

1. (อาจารย์ที่ปรึกษา) อาจารย์กฤตากร กล่อมการ ซึ่งคำแนะนำและข้อมูลในการดำเนินการ

2. คุณสุรเดช วิเศษอุดมศักดิ์ (หัวหน้าแผนก U-Link) ซึ่งจัดหาแรงบันดาลใจ

3. คุณประทีป ปานดิษฐ์ (หัวหน้าที่ทำกรเครือข่ายวิทยุโทรเลข กองสื่อสารวิทยุอาณานิคมใน  
ประเทศ การสื่อสารแห่งประเทศไทย) ซึ่งอนุญาตให้ใช้สถานที่และเครื่องมือวัด รวมทั้งอุปกรณ์ในการทำงาน  
ยังผลให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วง

ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. Benjamin Jacoby Ph; Walsh Function A Digital Fourier Series
2. IS Gonorovsky, Radio Circuit and Signals (MIR Publishers, Moscow, 1981)
3. Simon Haykin, Communication Systems, (John Wiley and Sons, 1983)
4. Benard Skla Digital Communications Fundamental and Applications, (Prentice Hall, 1988)
5. W.A. Evan, Sinewave Synthesis using Walsh Functions, (EE Proceedings Vol 134 No 1, February, 1987)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้