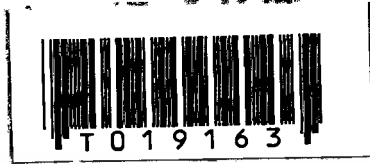


# คำนำหน้าหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์  
LASER TARGET DESIGNATION SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2535

ISBN 974-8158-35-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LASER TARGET DESIGNATION SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
MASTER OF ELECTRICAL ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
1992  
ISBN 974-8158-35-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

นักศึกษา

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ระดับการศึกษา

ภาควิชา

พ.ศ.

ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์

พันโท ณรงค์ หมั่นพลศรี

รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2535

### บทคัดย่อ

ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ ประกอบด้วย อุปกรณ์ซึ่งเป้าด้วยเลเซอร์ ซึ่งมีเครื่องกำเนิดสัญญาณแสงเลเซอร์อยู่ภายใน เป้าหมาย และระบบติดตามเป้าหมาย เมื่อสัญญาณแสงอินฟราเรดเลเซอร์ถูกฉายไปยังเป้าหมาย สัญญาณแสงเลเซอร์นี้จะสะท้อนออกจากเป้าหมายนั้น ถ้าโฟโตไดโอดที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณแสงในระบบติดตามเป้าหมายสามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมายได้ สัญญาณแสงนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีลักษณะสอดคล้องกับสัญญาณแสง แล้วถูกขยายและกรองสัญญาณรบกวนออก สัญญาณที่ผ่านการกรองไปได้จะถูกนำไปถอดรหัสโดยวงจรถอดรหัสช่วงความถี่ แล้วส่งผลไปยังวงจรภาคควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่เพื่อยังคับให้ระบบหันเข้าหาเป้าหมาย ตลอดเวลาที่เป้าหมายนั้นถูกชี้ด้วยสัญญาณแสงเลเซอร์ ระบบจำลองถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำการทดลอง กลุ่มสัญญาณพัลส์ของแสงเลเซอร์ถูกปลดปล่อยออกจากเลเซอร์ไดโอดโฟโตไดโอดชนิด พีไอเอ็น ทำหน้าที่รับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้า ผลการถอดรหัสสัญญาณสามารถใช้ควบคุมทิศทางการหมุนของแกนสแตปปีงมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ได้ ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ เพื่อการประยุกต์ใช้งานจริงได้

Thesis Title            Laser Target Designation System  
 Student                 Lt.Col. Narong Munpollasri  
 Thesis Advisor        Assoc.Prof.Dr.Somkiat Supadech  
 Level of Study         Master of Engineer in Electrical Engineering  
 Department            Electronic King Mongkut's Institute of  
    Technology Ladkrabang  
 Year                      1992

### ABSTRACT

Laser target designation system has been composed of target designator with laser signal generator inside, target and laser tracking system. When the infrared laser signal is illuminated on the target, the laser signal will be reflected from the target. If the reflected laser signal can be detected by photodiodes, performing as optical detectors, then the laser signal is transformed to an according electrical signal. The signal is amplified and filtered to get rid of noise. The filtering signal is decoded by tone decoder circuit and the output is passed to the directional control section for controlling the laser tracking system to turn towards the illuminated target all time the target is designated. Simulation systems were set up for experimentation. Laser pulsed trains were generated from laser diode. The pin photodiode was used for detecting the reflected signal from the target. The rotational direction of the stepping motor could be controlled by the decoding output as designed. The study results show that the development of the laser target designation system for the real applications can be possible.

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ คุภเกษ คร.แคเนียล บริน  
รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล และ ผศ.พลพดุง  
พดุงกุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ  
ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวก  
หลายอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณปิยะนันท์ ใจกว้าง ได้สนับสนุนการจัดทำแผ่นปรินต์  
ลายวงจรทดลอง คุณสุนทร อินทร์ผ่อง ได้ให้ความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์ประกอบ  
การทดลอง และ พ.อ.อ.หญิง บรรจง ออบกลิ่น ได้ช่วยเหลือในการจัดพิมพ์รายงาน  
วิทยานิพนธ์เล่มนี้ หากขาดบุคคลดังกล่าวแล้ววิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วง  
ลงได้ด้วยดี

พันโท ณรงค์ หมั่นพลศรี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ.....	1
2. ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์.....	3
2.1 อุปกรณ์ที่เป่าด้วยเลเซอร์.....	3
2.1.1 เลเซอร์ไดโอด.....	6
2.2 เป้าหมาย.....	11
2.3 ระบบติดตามเป้าหมาย.....	12
2.3.1 ตัวรับสัญญาณแสง.....	12
2.3.2 ภาคเตรียมการขยายสัญญาณ.....	23
2.3.3 วงจรรองความถี่แบบผ่านแถบ.....	26
2.3.4 วงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม.....	32
2.3.5 ภาคขยายสัญญาณ.....	36
2.3.6 วงจรขลิบสัญญาณ.....	39
2.3.7 วงจรขยายความกว้างของพัลส์.....	41
2.3.8 วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	43
2.3.9 ภาคถอดรหัสสัญญาณ.....	45
2.3.10 ภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่.....	48
3. การสร้างวงจรทดลอง และการทดสอบวงจร.....	70
3.1 อุปกรณ์ที่เป่าด้วยเลเซอร์.....	70
3.2 ระบบติดตามเป้าหมาย.....	81
3.2.1 ภาครับและขยายสัญญาณ.....	81
3.2.2 ภาคถอดรหัสสัญญาณ.....	89
3.2.3 ภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่.....	96

บทที่	หน้า
4. การทดลอง และผลการทดลอง.....	107
4.1 การทดลองหาผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรถ่ายสัญญาณแบบผ่านแถบ.....	107
4.2 การทดสอบหามุมมองของซุ้รับสัญญาณแสง.....	109
4.3 การทดสอบการรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมาย.....	109
4.4 การทดลองหาขนาดของสัญญาณที่สะท้อนจากเป้าที่ระยะต่าง ๆ.....	111
4.5 การทดลองหาผลการตอบสนองต่อสัญญาณเมื่อเปลี่ยนสีของเป้า.....	114
4.6 การทดสอบการเชื่อมโยงภาคถอดรหัสสัญญาณเข้ากับภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่.....	114
5. บทสรุป.....	123
เอกสารอ้างอิง.....	129
ผนวก ก. HFD Series (1060; 1100) Ultra-Fast Photodiode/ OP-AMP.....	131
ผนวก ข. LM592 Differential Video Amp.....	133
ผนวก ค. LM567/LM567C Tone Decoder.....	138
ประวัติผู้เขียน.....	144

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงความสัมพันธ์ของการตอบสนองของระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ต่อเป้าหมายที่ตรวจจับได้ด้วยไพโตโคไอคตาแหน่งต่าง ๆ .....	21
2. การกระตุ้นสเตรปโตมอเตอร์ 4 เฟส แบบกระตุ้น ครั้งละ 2 เฟส ให้หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	53
3. การกระตุ้นสเตรปโตมอเตอร์ 4 เฟส แบบกระตุ้น ครั้งละ 2 เฟส ให้หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	53
4. เมื่อ $A = 0$ และ $B = 1$ วงจรจะนับขึ้น.....	55
5. เมื่อ $A = 1$ และ $B = 0$ วงจรจะนับลง.....	55
6. เมื่อ $A = 0$ และ $B = 0$ วงจรจะนับกลับไปกลับมาระหว่างค่า 00 และ 01.....	56
7. เมื่อ $A = 1$ และ $B = 1$ วงจรจะนับกลับไปกลับมาระหว่างค่า 00 และ 11.....	56
8. ตารางแสดงค่าความจริงของวงจรถอครหัสการนับที่ลำดับชั้นต่าง ๆ ในกรณีที่สเตรปโตมอเตอร์ถูกกระตุ้น ครั้งละ 2 เฟส ให้แกนหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	57
9. ตารางแสดงค่าความจริงของวงจรถอครหัสการนับที่ลำดับชั้นต่าง ๆ ในกรณีที่สเตรปโตมอเตอร์ถูกกระตุ้น ครั้งละ 2 เฟส ให้แกนหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	57
10. อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้าสีต่าง ๆ ที่ตัวรับสัญญาณแสงรับได้ที่ระยะห่างจากเป้า 6 เมตร.....	115
11. อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้าสีต่าง ๆ ที่ตัวรับสัญญาณแสงรับได้ที่ระยะห่างจากเป้า 8 เมตร.....	116

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1. ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์.....	4
2. ตัวอย่างระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ แสงเลเซอร์ถูกยิงจาก อุปกรณ์ที่เป่าด้วยเลเซอร์โดยผู้ตรวจการณ์ภาคพื้นดินไปยังเป้าหมายที่ เป็นรถถังจรวดนำวิถีด้วยแสงเลเซอร์ทำหน้าที่เป็นระบบติดตามเป้าหมาย จะถูกควบคุมให้วิ่งเข้าสู่ตำแหน่งที่แสงเลเซอร์สะท้อนออกมาจากผิวของ เป้าหมาย.....	4
3. ลักษณะอุปกรณ์ที่เป่าด้วยเลเซอร์แบบหนึ่งที่ใช้ในกิจการทหาร.....	5
4. แผนภาพแสดงชนิด และย่านความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่สามารถนำ มาใช้งานได้.....	5
5. ลักษณะของสัญญาณแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่อง กำเนิดเลเซอร์.....	7
6. ลักษณะ โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดแบบต่าง ๆ (ก) เลเซอร์ไดโอดชนิดโครงสร้างสองด้านเหมือนกัน (ข) เลเซอร์ไดโอดชนิดโครงสร้างแตกต่างกันแบบชั้นเดียว (ค) เลเซอร์ไดโอดชนิดโครงสร้างแตกต่างกันแบบชั้นคู่.....	7
7. ลักษณะมูลฐานของเลเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำไดโอด.....	8
8. หนทางที่จะนำไปสู่การเกิดแสงเลเซอร์ในสารกึ่งตัวนำ (ก) การดูดกลืนพลังงาน (ข) การปลดปล่อยพลังงานชั่วขณะปราศจากการเร้า (ค) การปลดปล่อยพลังงานที่เกิดจากการเร้า.....	8
9. ลักษณะของเลเซอร์ไดโอดที่มีขายในเชิงการค้า.....	9
10. การติดตั้งเลเซอร์ไดโอดกับระบบเลนส์.....	9
11. แผนผังการเชื่อมโยงระบบต่าง ๆ รวมเข้าเป็นระบบติดตามเป้าหมาย สำหรับชุดควบคุมการเคลื่อนที่ใน 1 แกน.....	13
12. (ก) ลักษณะของสัญญาณเมื่อผ่านออกจากภาคขยายสัญญาณ (ข) ลักษณะของสัญญาณ เมื่อผ่านออกจากภาคขยายความกว้างของ สัญญาณเข้าไปสู่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (ค) ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคกรองความถี่ต่ำผ่าน เข้าไปสู่ ภาคถอดรหัส (tone decoder).....	14

	หน้า
13. วงจรของโฟโตไดโอดชนิด pin ที่ได้รับการไบแอสกลับ.....	16
14. แสดงรูปแบบอย่างง่าย ๆ ของแถบพลังงานสำหรับโฟโตไดโอดชนิด pin. โฟตอนที่ม่พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงาน $E_g$ สามารถทำให้เกิดการปลดปล่อยคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลอิสระซึ่งเป็นพาหะของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง.....	16
15. ตัวอย่างของโฟโตไดโอดบางแบบที่ผลิตขึ้นใช้งาน.....	18
16. การติดตั้งโฟโตไดโอด 4 ตัว บนระบบติดตามเป้าหมาย (ก) เมื่อมองจากทางด้านหน้า (ข) เมื่อมองจากทางด้านข้าง.....	18
17. ลักษณะการคลุมพื้นที่ที่สามารถรับสัญญาณแสงสะท้อนจากเป้า (ก) ของโฟโตไดโอดแต่ละตัวเมื่อมองจากระบบติดตามเป้าหมายออกไป (ข) ของโฟโตไดโอดสองตัวที่ติดตั้งอยู่ทางด้านตรงกันข้าม เมื่อมองจากทางด้านข้าง.....	19
18. ลักษณะการติดตั้งเลนส์ และลักษณะของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด (ก) เมื่อลำแสงมาจากทางด้านตรงหน้า (ข) เมื่อลำแสงมาจากทางด้านบน (ค) เมื่อลำแสงมาจากทางด้านล่าง.....	20
19. ลักษณะของวงจรในภาคเตรียมการขยายสัญญาณ (ก) วงจรขยายสัญญาณแบบทรานซิสมที่แคนท์ที่นำมาใช้งาน (ข) ลักษณะวงจรสมมูลย์ของวงจรขยายสัญญาณแบบทรานซิสมที่แคนท์.....	25
20. วงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบ RLC.....	28
21. ความสัมพันธ์ระหว่าง อิมพีแดนซ์ (Z) รีแอกแตนซ์แบบความเหนี่ยวนำ ( $X_L$ )รีแอกแตนซ์แบบความจุ ( $X_C$ ) กับความถี่ ( $\omega$ ).....	28
22. การเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจร RLC ที่ต่อกันแบบอนุกรมที่ความถี่ต่าง ๆ.....	29
23. (ก) วงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม (ข) วงจรสมมูลย์.....	33
24. ฟังแสดงตำแหน่งขาของไอซี เบอร์ LM592 เมื่อมองทางด้านบน.....	37
25. ลักษณะการต่อวงจรใช้งานของไอซีวงจรขยายสัญญาณเบอร์ LM592	

	หน้า
แบบปรับอัตรการขยายได้.....	37
26. อัตรการขยายสัญญาณความต่างศักย์แบบผลต่างของสัญญาณทางด้าน เอาท์พุทเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่ใช้ในการปรับค่าอัตร การขยาย.....	38
27. อัตรการขยายสัญญาณความต่างศักย์ที่ปลายเอาท์พุทเดียวที่ความถี่ ต่าง ๆ สำหรับการขยายแบบอัตรการขยายคงที่ (GAIN 1 และ GAIN 2).....	38
28. วงจรขลิบสัญญาณแบบกลับเฟส.....	40
29. ขีดจำกัดของการอิมิตัวและการคัทออฟของทรานซิสเตอร์.....	40
30. วงจรขยายความกว้างของพัลส์.....	42
31. วงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน.....	44
32. การตอบสนองของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แบบ RC ต่อสัญญาณที่เป็นแบบพัลส์.....	44
33. วงจรถอครหัสความถี่ของสัญญาณ.....	47
34. ความสัมพันธ์ระหว่างแถบความกว้างของการตรวจจับความถี่กับ ขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุทสำหรับ $f_0C_2$ ค่าต่าง ๆ.....	47
35. สเตปป์มอเตอร์.....	49
36. โครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของสเตปป์มอเตอร์ แบบ 4 เฟส.....	49
37. แสดงตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อ $\theta_1$ และ $\theta_2$ ของ สเตปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส ถูกกระตุ้นพร้อมกัน.....	52
38. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโรเตอร์ และเฟสต่าง ๆ ที่ถูกกระตุ้น.....	52
39. วงจรนับขึ้น-นับลง.....	54
40. แผนภาพคาร์นอจ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอครหัสการนับ ในกรณีของ $\theta_1$ .....	60
41. แผนภาพคาร์นอจ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอครหัสการนับ ในกรณีของ $\theta_2$ .....	60
42. แผนภาพคาร์นอจ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอครหัสการนับ ในกรณีของ $\theta_3$ .....	61
43. แผนภาพคาร์นอจ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอครหัสการนับ	

	หน้า
ในกรณีของ $\partial_4$ .....	61
44. วงจรถอครห์สการนับ.....	67
45. วงจรขับสเคปบั้งมอเคอร์แบบต่าง ๆ.....	68
46. วงจรของชคอุปกรณก่าเนคสัญญานแสงเลเซอร์แบบพัลส์.....	71
47. ลักษณะของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ออกทางด้านขาที่ 3 ของไอซีเบอร์ 555 ในวงจรอะสเคเบิ้ล.....	72
48. ลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่ออกทางขาเบส 1 ของ ยูเจที่ ใช้สำหรับ จุดชนวนเกทของ เอสซีอาร์.....	72
49. ลักษณะของสัญญาณพัลส์ เมื่อวัคครอมความต้านทาน 1 โอห์ม ที่ทำหน้าที่เป็นมอนิเตอร์ของกระแส.....	79
50. ลักษณะของสัญญาณพัลส์ของแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกจาก เลเซอร์ไดโอด.....	79
51. ชคอุปกรณช้เป้าหมายด้วยแสงเลเซอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทดสอบการ ทำงานของระบบคิดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์.....	80
52. วงจรภาครับและขยายสัญญาณ.....	82
53. ลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด (บน) กับลักษณะของแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมา (ล่าง).....	85
54. วงจรภาคถอครห์สัญญาณ.....	90
55. ลักษณะของสัญญาณเมื่อผ่านวงจรขลิบสัญญาณและกลับเฟส.....	91
56. ลักษณะของกลุ่มพัลส์เมื่อผ่านออกจากวงจรขยายความกว้างของพัลส์...	91
57. ลักษณะของสัญญาณเมื่อผ่านออกจากวงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำ ผ่าน.....	91
58. วงจรเรียงลำดับตรรก.....	97
59. วงจรก่าเนคสัญญาณนาฬิกาที่ปรับความถี่ได้.....	98
60. สถานะและการเรียงลำดับตรรกทางด้านเอาต์พุทของวงจรเรียงลำดับ ตรรก สำหรับใช้กระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสเคปบั้งมอเคอร์ตามลำดับ สัญญาณนาฬิกา เมื่อ $A = 0$ และ $B = 1$ .....	99
61. สถานะและการเรียงลำดับตรรกทางด้านเอาต์พุทของวงจรเรียงลำดับ ตรรก สำหรับใช้กระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสเคปบั้งมอเคอร์ตามลำดับ สัญญาณนาฬิกา เมื่อ $A = 1$ และ $B = 0$ .....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
62. วงจรขับสแตมป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส แสดงการเชื่อมโยงไปยัง สเตเตอร์เฟสต่าง ๆ ของสแตมป์มอเตอร์.....	101
63. การติดตั้งสแตมป์มอเตอร์เข้ากับระบบจำลองของระบบติดตาม เป้าหมาย.....	106
64. การตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ต่าง ๆ ของวงจรรักษาขยายสัญญาณแบบ ผ่านแถบ เมื่อให้สัญญาณทางด้านอินพุตคงที่เท่ากับ 2 mV.....	108
65. แสดงแนวฝาผนัง และตำแหน่งจุดวางชุดรับสัญญาณแสง เลเซอร์ เพื่อหาความกว้างของมุมมองของชุดรับสัญญาณแสง เลเซอร์.....	110
66. ลักษณะของสัญญาณที่ผ่านออกทางด้านเอาต์พุตของวงจรรักษาขยายสัญญาณ (บน) และเมื่อผ่านออกจากวงจรกรองความถี่ต่ำก่อนการถอดรหัส ช่วงความถี่ (ล่าง).....	112
67. ขนาดของสัญญาณแสง เลเซอร์ที่วงจรชุดรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณ สะท้อนจากเป้าหมายได้ที่ระยะต่าง ๆ .....	113
68. ไฟโตไดโอด และชุดประกอบเลนส์.....	119
69. ลักษณะการติดตั้งตัวรับสัญญาณแสงบนระบบติดตามเป้าหมาย.....	120
70. วงจรรักษาขยายสัญญาณและภาคถอดรหัสสัญญาณที่สร้างขึ้นทดสอบ.....	121
71. ชุดอุปกรณ์ภาคควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ที่สร้างขึ้นทดสอบ.....	122
72. ไฟโตไดโอด แบบ 4 ควอดแรนท์.....	126
73. ลักษณะการติดตั้งแผ่นกรองแสง เลนส์รวมแสง และไฟโตไดโอดแบบ 4 ควอดแรนท์.....	127
74. การต่อไฟโตไดโอด แบบ 4 ควอดแรนท์ ไปยังวงจรรักษาปริแอมป์....	127
75. ตัวอย่างระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ กระสุนปืนใหญ่หน้าวิถีเข้าหา เป้าหมายด้วยแสงเลเซอร์ Deadeye ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว..	128

## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ได้ถูกนำไปพัฒนาใช้อย่างกว้างขวางในกิจการทหาร เช่น จรวดนำวิถีด้วยแสงเลเซอร์ กระสุนปืนใหญ่นำวิถีด้วยแสงเลเซอร์ การทิ้งระเบิดนำวิถีด้วยแสงเลเซอร์ เป็นต้น ระบบดังกล่าวให้ความแม่นยำสูง แต่มีราคาจำหน่ายจากประเทศผู้ผลิตแพงมาก จึงมีการปิดบังความรู้ และ เทคโนโลยีทางด้านนี้ ถ้าหากจะพัฒนาระบบนี้ขึ้นมาใช้งานเองแล้ว การแสวงหาความรู้ และ เทคโนโลยีทางด้านนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็น ความมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือ เพื่อศึกษาแนวทาง กรรมวิธี และ ความเป็นไปได้ ในการวิจัยและพัฒนาติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ ไปสู่การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นทดสอบ ระบบติดตามเป้าหมายด้วยแสงเลเซอร์ที่จะทำการศึกษานี้ มีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ชุดอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงเลเซอร์ เป้าหมาย และระบบติดตามเป้าหมาย เมื่อแสงเลเซอร์ถูกยิงจากแหล่งกำเนิดสัญญาณแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนเป้าหมาย สัญญาณแสงเลเซอร์จะสะท้อนกระจายออกจากเป้าหมายนั้น ถ้าชุดรับสัญญาณแสงที่อยู่ในระบบติดตามเป้าหมายสามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมายได้ ระบบติดตามเป้าหมายนี้จะถูกบังคับโดยภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ที่อยู่ภายในระบบนี้ให้หันหน้าเข้าหาเป้าหมายที่ถูกชี้ตลอดเวลาที่ระบบสามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมายได้ การศึกษาการทำงานของระบบติดตามเป้าหมายด้วยแสงเลเซอร์นี้ จะทำการศึกษาลักษณะการทำงานของทั้งภาคทฤษฎี และสร้างแบบจำลองขึ้นมาทดสอบการทำงานของระบบ

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงรายละเอียดและแนวทางภาคทฤษฎีเกี่ยวกับชุดอุปกรณ์ซึ่งเป้าด้วยเลเซอร์ ลักษณะของเลเซอร์ไดโอดที่จะจำลองไปใช้ในการทดสอบ ในระบบติดตามเป้าหมายนั้นจะกล่าวถึงส่วนต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบภายในระบบ คือ ตัวรับสัญญาณแสง ภาคเตรียมการขยายสัญญาณ วงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบ วงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม วงจรขยายสัญญาณความถี่ต่าง วงจรขลิบและกลับเฟสสัญญาณ วงจรขยายความถี่ของพัลส์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรถอดรหัสช่วงความถี่สัญญาณ และภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นกรกล่าวถึงรายละเอียดในการนำสแตมป์มอเตอร์ มาใช้ในการบังคับให้ระบบหันเลี้ยวติดตามเป้าหมายที่ถูกชี้ด้วยสัญญาณแสงเลเซอร์

ในบทที่ 3 เป็นการสร้างวงจรทดลองและการทดสอบการทำงานของวงจรทดลอง วงจรทดลองที่สร้างขึ้นได้แก่ วงจรเครื่องกำเนิดสัญญาณแสง เลเซอร์จาก เลเซอร์ไดโอด วงจรต่าง ๆ ในระบบติดตามเป้าหมายซึ่งประกอบด้วยวงจร 3 ภาคใหญ่ ๆ คือ ภาครับและขยายสัญญาณ ภาคถอดรหัสสัญญาณ และภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ พร้อมกล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบและทดสอบวงจร

ในบทที่ 4 กล่าวถึงการนำวงจรทดลองที่สร้างขึ้นมาทำการทดลอง และผลการทดลอง โดยทำการทดลองเกี่ยวกับการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรภาคขยายสัญญาณแบบผ่านแถบ การหาความกว้างของมุมมองของตัวรับสัญญาณแสงที่ประกอบเลนส์นูน ทดสอบการรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมาย ทดสอบการทำงานของวงจรภาคถอดรหัสสัญญาณที่ตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ใช้เป้าหมาย ทดลองหาระยะทางที่ระบบสามารถรับสัญญาณได้ ทดลองผลการตอบสนองต่อสัญญาณเมื่อเปลี่ยนสีของเป้า ทดสอบการเชื่อมโยงวงจรภาคถอดรหัสสัญญาณเข้ากับวงจรภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ เพื่อคุณลักษณะการทำงานและการตอบสนอง เมื่อชุดรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมายได้

ในบทที่ 5 เป็นการสรุปและวิจารณ์เกี่ยวกับระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ที่ได้ทำการศึกษาและทดสอบพร้อมแสดงข้อคิดเห็นเพิ่มเติมในการที่จะนำระบบนี้ไปประยุกต์ใช้งาน

การสร้างระบบจริงขึ้นมาทดสอบใช้งาน เป็นเรื่องที่ไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาแพง การจัดซื้อจัดหาทำได้ยาก เพราะอุปกรณ์หลายอย่างต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ตลอดจนระยะเวลาที่จะใช้ทำการศึกษาและดำเนินการมีจำกัด จึงได้สร้างระบบจำลองขึ้นมาทดสอบแทน อย่างไรก็ตามก็ได้คิดผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำหลักการและวงจรต่าง ๆ ไปประยุกต์ใช้งานจริงได้

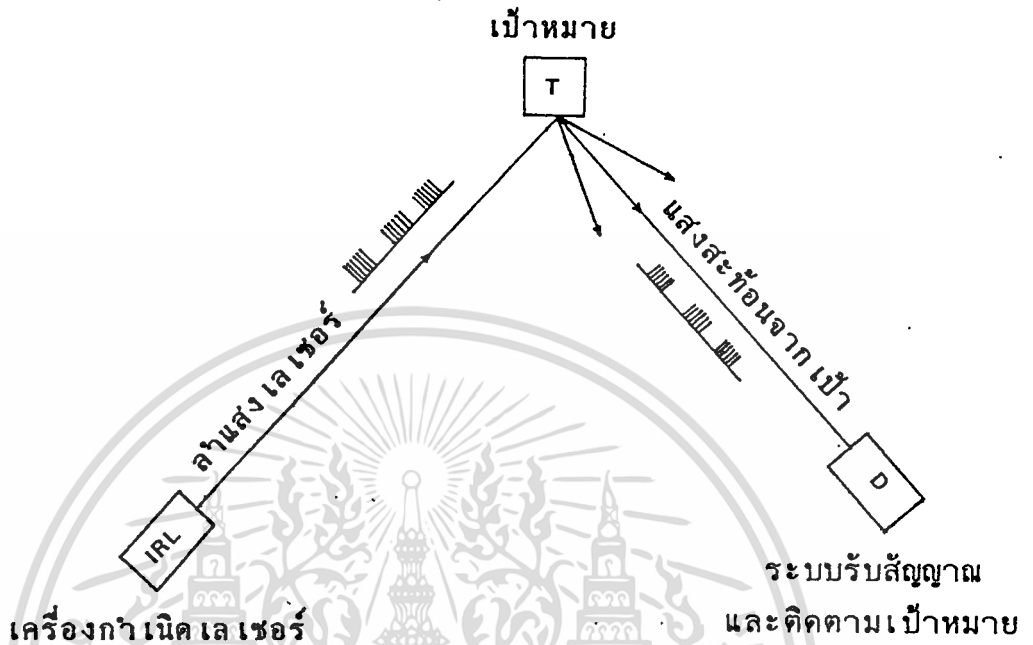
ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์  
(LASER TARGET DESIGNATION SYSTEM)

ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ มีองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง คือ เครื่องกำเนิดสัญญาณเลเซอร์สำหรับใช้ชี้เป้าหมาย เป้าหมาย และระบบติดตามเป้าหมาย โดยองค์ประกอบทั้งสามจะแยกกันอยู่อย่างอิสระ แสงเลเซอร์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณเลเซอร์จะถูกยิง ไปกระทบบนพื้นผิวของเป้าหมาย แล้วสะท้อนออกจากเป้าหมายนั้น ไปยังตัวรับสัญญาณแสงเลเซอร์ (photodetectors) ซึ่งอยู่ภายในระบบติดตามเป้าหมายที่อยู่ห่างออกไป สัญญาณแสงเลเซอร์ที่รับได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์แล้วถูกนำไปขยายและถอดรหัส สามารถทำให้ทราบได้ว่าเป้าหมายนั้นอยู่ในทิศทางใดเมื่อเทียบกับตัวระบบติดตามเป้าหมาย และสามารถส่งสัญญาณไปยังระบบควบคุม เพื่อบังคับให้ระบบติดตามเป้าหมายหันตรง ไปยังเป้าหมายที่ถูกชี้ด้วยแสงเลเซอร์นั้น [1],[2],[3]

2.1 อุปกรณ์ชี้เป้าด้วยเลเซอร์

อุปกรณ์ชี้เป้าด้วยเลเซอร์มีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เครื่องกำเนิดสัญญาณแสงเลเซอร์ (laser signal generator) และส่วนประกอบทางทัศนศาสตร์ (optical components) ใช้สำหรับเล็งและชี้ไปยังเป้าหมาย แสงเลเซอร์ที่ใช้สำหรับชี้เป้าหมายในทางทหารมีได้หลายแบบหลายชนิด [2],[3],[4],[5] แต่ชนิดที่นิยมใช้มากเป็นแบบเลเซอร์ในย่านอินฟราเรดแบบพัลส์(pulsed infrared lasers) สาเหตุที่ใช้แสงเลเซอร์แบบนี้ คือ

1. ลำแสงเลเซอร์ เป็นลำแสงที่แคบมาก จึงสามารถใช้ชี้เฉพาะเป้าหมายให้เด่นชัด แยกออกจากเป้าหมายอื่นได้อย่างชัดเจน
2. สเปกตรัม (spectrum) ของแสงเลเซอร์แต่ละชนิดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นหนึ่งซึ่งแคบมากจึงสามารถใช้กระจกกรองแสง (filter) กรองเอาแสงรบกวนในช่วงความยาวคลื่นอื่นออกไป เหลือเฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการนำไปใช้งาน
3. แสงเลเซอร์แบบพัลส์ที่มีพลังงานสูงมาก สามารถทำได้ง่ายกว่าแสงเลเซอร์แบบต่อเนื่องที่มีพลังงานสูงเท่ากัน เนื่องจากเลเซอร์ดังกล่าวมีพลังงานสูงและมีลำแสงแคบมาก จึงสามารถใช้ชี้เป้าหมายได้ที่ระยะไกล ๆ
4. เนื่องจากแสงเลเซอร์ที่ส่งออกไปมีลักษณะสัญญาณเป็นแบบพัลส์ จึงสามารถทำการตรวจจับสัญญาณ และแยกสัญญาณออกจากแสงธรรมชาติได้ เพราะแสงที่



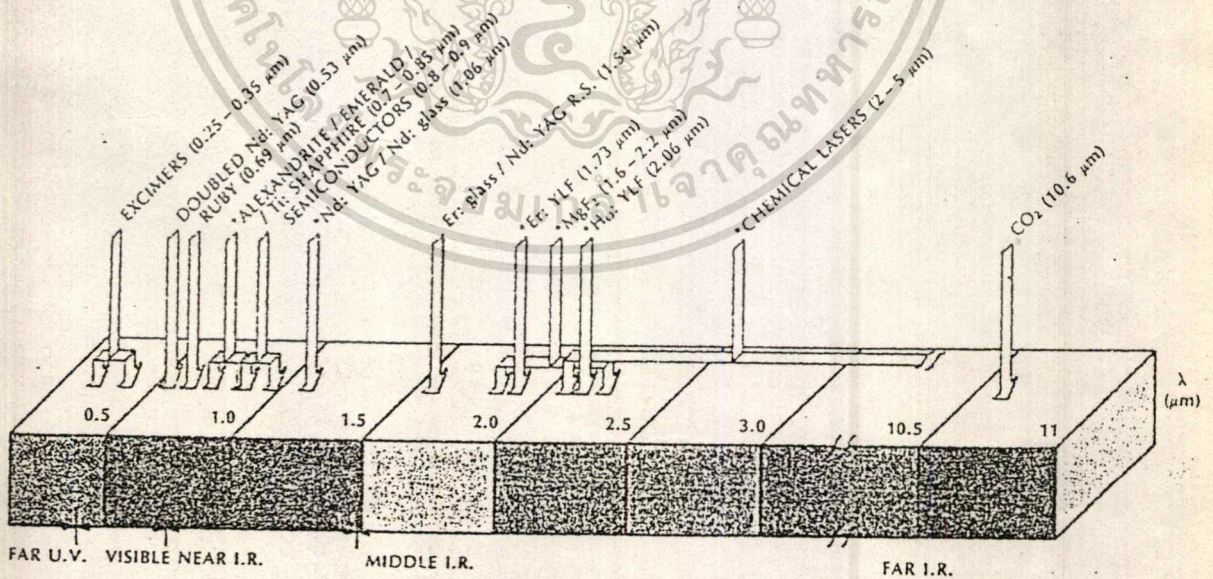
รูปที่ 1. ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์



รูปที่ 2. ตัวอย่างระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ แสงเลเซอร์ถูกยิงจากอุปกรณ์ซึ่งเป่าด้วยเลเซอร์โดยผู้ตรวจการณ์ภาคพื้นดินไปยังเป้าหมายที่เป็นรถถังจรวดนำวิถีด้วยแสงเลเซอร์ทำหน้าที่เป็นระบบติดตามเป้าหมายจะถูกควบคุมให้วิ่งเข้าสู่ตำแหน่งที่แสงเลเซอร์สะท้อนออกมาจากผิวของเป้าหมาย



รูปที่ 3. ลักษณะอุปกรณ์ซึ่งเป่าด้วยเลเซอร์แบบหนึ่งที่ใช้ในกิจการทหาร



รูปที่ 4. แผนภาพแสดงชนิด และย่านความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่สามารถนำมาใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

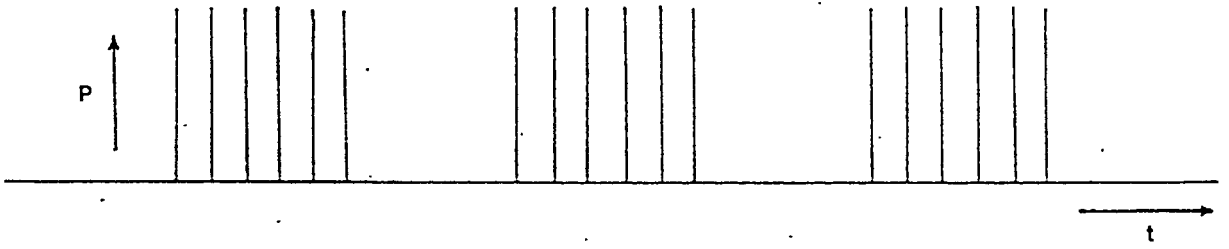
เกิดขึ้นจากธรรมชาติ เช่น แสงจากดวงอาทิตย์ โดยทั่วไปแล้วมีลักษณะเกือบจะคงที่

5. แสงเลเซอร์ดังกล่าวอยู่ในย่านของแสงอินฟราเรด จึงไม่สามารถมองเห็นหรือสังเกตได้ด้วยสายตาธรรมดา จึงเป็นการพรากการซึ่งเป้าหมายได้เป็นอย่างดี

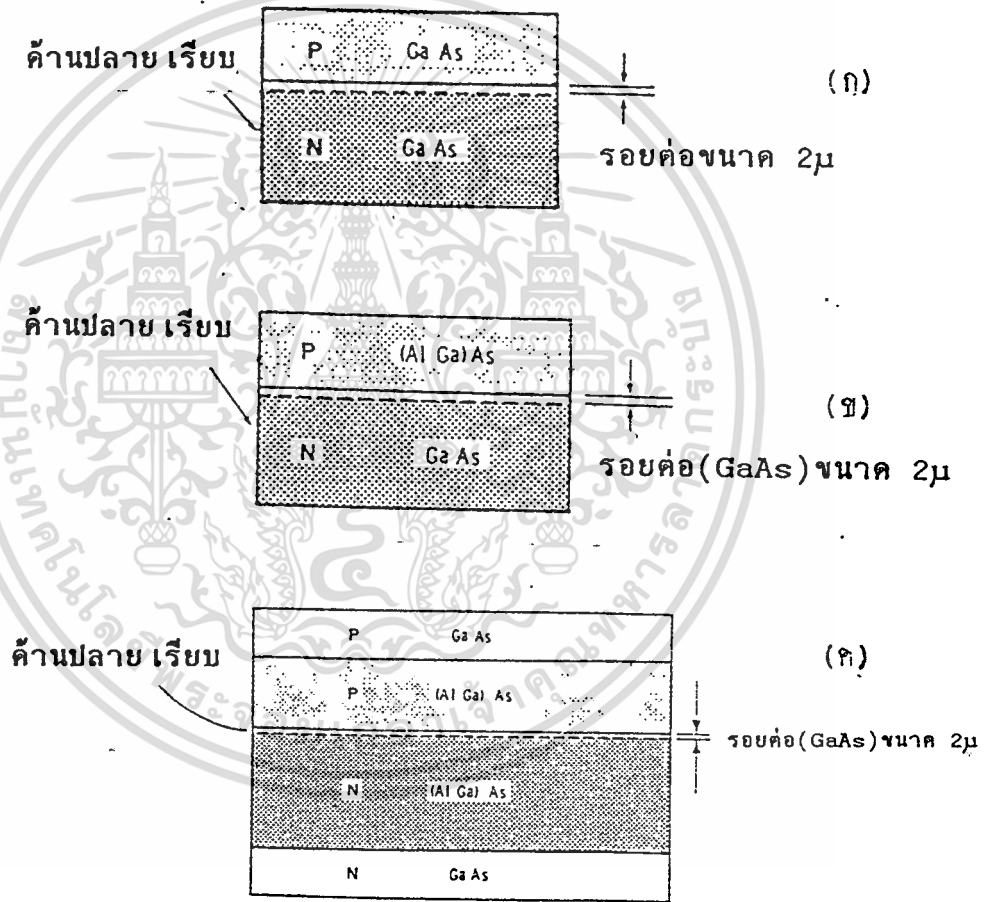
เลเซอร์ในย่านแสงอินฟราเรดที่สามารถนำมาใช้งานจริงทำให้เกิดได้จากแหล่งกำเนิดชนิดต่าง ๆ หลากรูปแบบและมีหลายความยาวคลื่น ดังแสดงไว้ในแผนภาพรูปที่ 4 ตัวอย่างแหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่นิยมนำมาใช้กัน เช่น Nd:YAG, Nd:Glass, Er:Glass, CO<sub>2</sub> ฯลฯ ส่วนลักษณะของพัลส์ของสัญญาณแสงเลเซอร์สำหรับใช้ซึ่งเป้าหมายนั้นจะแตกต่างกันขึ้นกับผู้ออกแบบระบบจะเป็นผู้กำหนดขึ้นเอง เนื่องจากอุปกรณ์กำเนิดแสงเลเซอร์ที่จะนำมาใช้งานจริงมีราคาสูงมาก ไม่สามารถจัดหามาใช้ทดลองจริงได้เพราะงบประมาณมีจำกัด และแสงเลเซอร์ดังกล่าวมีอันตรายสูงต่อระบบสายตาของมนุษย์ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ เป็นพิเศษ จำเป็นต้องใช้งบประมาณและเวลา มาก จึงได้ทำการทดลองระบบนี้ขึ้นโดยใช้ระบบจำลอง (simulation system) แทนระบบจริง ซึ่งถ้าผลการทดลองออกมาเป็นผลสำเร็จแล้วสามารถที่จะนำผลนี้ไปขยายใช้งานจริงได้ ซึ่งนับว่าเป็นหนทางประหยัดงบประมาณและเวลาลงได้มากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ในย่านอินฟราเรดที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำประเภทไดโอด (semiconductor laser diode) ซึ่งมีความยาวคลื่น 904 นาโนเมตร (nanometer) มีพลังงานของยอดพัลส์สูงสุด 25 วัตต์ ลักษณะของพัลส์ของสัญญาณแสงเลเซอร์จะเป็นแบบกลุ่มของสัญญาณพัลส์ที่ปลดปล่อยเป็นชุด ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5

### 2.1.1 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดมีโครงสร้างแตกต่างกันหลายรูปแบบ [5], [6],[7] โครงสร้างหลักของเลเซอร์ไดโอดประกอบด้วยรอยต่อ PN ของสารกึ่งตัวนำ (PN junction) สารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเลเซอร์ไดโอดนี้ มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าอากาศเมื่อนำผิวผลึกด้านที่เป็นรอยต่อ PN สองด้านที่อยู่ตรงกันข้าม มาตัดให้แต่ละผิวเรียบมันและขนานกับผิวที่อยู่ตรงกันข้ามแล้ว ผิวทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นกระจกบ่อนกลับพลังงาน โดยมีบริเวณภายในเนื้อผลึกที่อยู่ระหว่างผิวขนานทั้งสองนั้นเป็น optical cavity ซึ่งเป็นเงื่อนไขหนึ่งที่จะทำให้เกิดแสงเลเซอร์ ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างของผิวผลึกสารกึ่งตัวนำสำหรับทำเลเซอร์ไดโอดดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อทำการไบแอสตรง (forward bias) ต่อเลเซอร์ไดโอดโดยต่อด้าน P เข้ากับขั้วบวกและด้าน N เข้ากับขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 7 อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำชนิด N จะถูกฉีด (inject) ข้ามรอยต่อ PN ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด P อิเล็กตรอนที่ข้ามรอยต่อ PN มายัง P นี้จะ

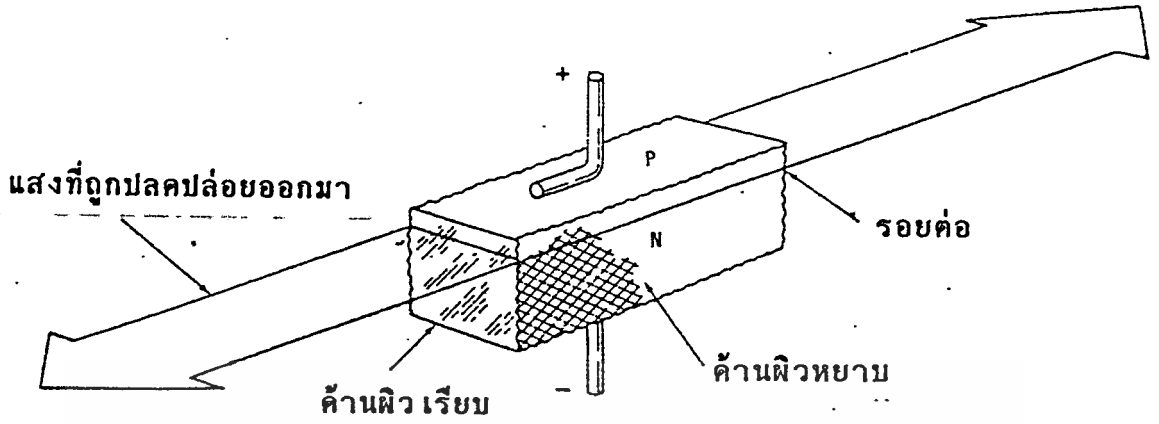


รูปที่ 5. ลักษณะของสัญญาณแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์

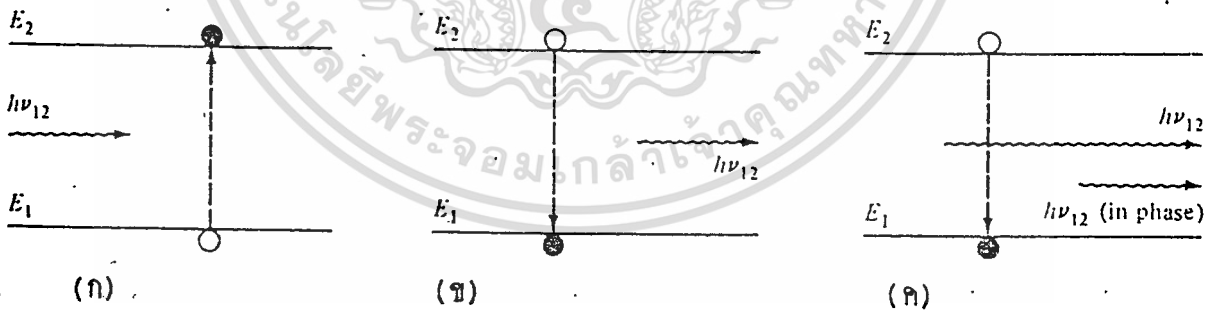


รูปที่ 6. ลักษณะ โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดแบบต่าง ๆ

- (ก) เลเซอร์ไดโอดชนิด โครงสร้างสองด้านเหมือนกัน
- (ข) เลเซอร์ไดโอดชนิด โครงสร้างแตกต่างกันแบบชั้นเดียว
- (ค) เลเซอร์ไดโอดชนิด โครงสร้างแตกต่างกันแบบชั้นคู่

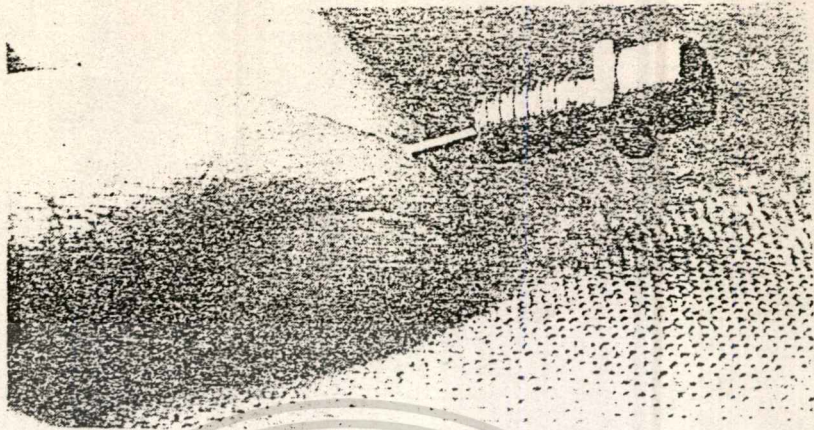


รูปที่ 7. ลักษณะมูลฐานของเลเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำโคโค



รูปที่ 8. หนทางที่จะนำไปสู่การเกิดแสงเลเซอร์ในสารกึ่งตัวนำ

- (ก) การดูดกลืนพลังงาน
- (ข) การปลดปล่อยพลังงานชั่วขณะปราศจากการเร้า
- (ค) การปลดปล่อยพลังงานที่เกิดจากการเร้า



**LASER DIODE**

LASER DIODE, INC.

Invisible Laser Radiation emitted from glass window

Type LD-65 Case — Pkg. TO-18

I<sub>TH</sub> 14A I<sub>M</sub> 40A P<sub>o</sub> 12W @ 25 °C

I<sub>TH</sub> — I<sub>M</sub> — P<sub>o</sub> — @ — °C

λ 904 Date of Mfr. 10/8/87

**LASER DIODE, INC.**  
 Made in New Brunswick, N.J. U.S.A.  
 This product conforms to DHEW regulation 21 CFR Subchapter J

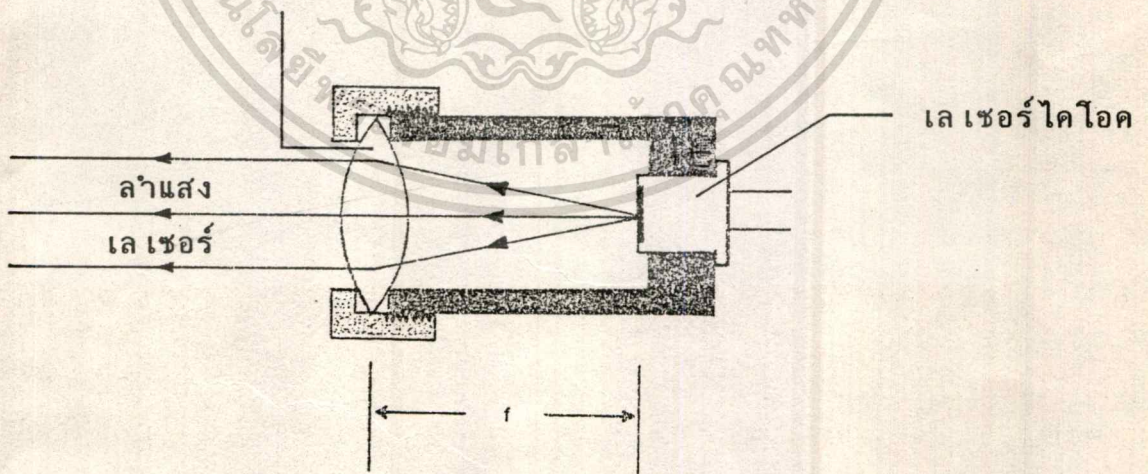
**DANGER**

"INVISIBLE LASER RADIATION AVOID DIRECT EXPOSURE TO BEAM."

MAX. PEAK POWER 25 WATTS  
 WAVELENGTH 904 nm.  
 "CLASS IIIb LASER PRODUCT."

รูปที่ 9. ลักษณะของเลเซอร์ไดโอดที่มีขายในเชิงการค้า

เลนส์รวมแสง



รูปที่ 10. การติดตั้งเลเซอร์ไดโอดกับระบบเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มีความถี่เดียวกัน เฟสเดียวกันเป็นประมาณมาก ๆ ซึ่งก็คือ แสงเลเซอร์นั่นเอง ดังนั้น แสงเลเซอร์จะเริ่มเกิดขึ้นที่ค่ากระแสขีดเริ่มค่าใดค่าหนึ่งที่แน่นอนถ้าเพิ่มกระแสผ่านรอยต่อ PN เกินค่ากระแสขีดเริ่มขึ้นไปอีก ผลึกเลเซอร์จะปลดปล่อยแสงเลเซอร์มากขึ้นไปอีก ถ้าหากปล่อยให้กระแสไหลผ่านรอยต่อ PN มากเกินไปจะเกิดความร้อนสูง เนื่องมาจากการปลดปล่อยแสงเลเซอร์ที่บริเวณรอยต่อ PN และจะทำให้เลเซอร์ไดโอดพัง การที่จะทำให้เลเซอร์ไดโอดปลดปล่อยพลังงานแสงเลเซอร์ออกมาได้สูง ๆ จะต้องควบคุมให้กระแสไหลผ่านรอยต่อ PN เป็นแบบพัลส์ ซึ่งจะทำให้ผลึกได้ระบายความร้อนสู่ภายนอกในช่วงเวลาระหว่างพัลส์ จึงทำให้ผลึกสามารถทนได้ ส่วนช่วงเวลาระหว่างพัลส์จะเป็นเท่าใดนั้น ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของผลึกและการระบายความร้อนที่ได้ออกแบบเอาไว้ สำหรับในเลเซอร์ไดโอดทั่วไปอย่างน้อยที่สุดจะต้องระบุข้อมูลการใช้งาน คือค่ากระแสขีดเริ่ม ค่ากระแสสูงสุด ค่าพลังงานสูงสุด ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์

เลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีข้อเสียอยู่อย่างหนึ่ง คือ มีลำแสงบานปลายขนาดใหญ่ เพราะการเปล่งแสงเกิดขึ้นภายในย่านหัวต่อแคบ ๆ การที่แสงถูกจำกัดตัวอยู่ในย่านแคบ ๆ นี้ทำให้เกิด คิฟแฟรกชัน (diffraction) และมีผลทำให้ลำแสงบานออกคล้ายรูปพัด (fan-shaped) ถ้าแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมามีความยาวคลื่น  $\lambda$  มีความกว้างรอยต่อ PN เท่ากับ  $a$  จะได้ค่าครึ่งหนึ่งของมุมคิฟแฟรกชัน (half-angle diffraction)  $\theta$  ดังนี้

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} \quad (1)$$

การทำให้ลำแสงเลเซอร์นี้มีทิศทางขนานกันจึงต้องอาศัยเลนส์นูนช่วย ดังรูปที่ 10

## 2.2 เป้าหมาย

เป้าหมาย คือ สิ่งที่เราต้องการให้ระบบติดตามเป้าหมายหันเข้าหาตลอดเวลาที่เราต้องการ คุณสมบัติของเป้าหมายที่เราต้องการคือ ความสามารถในการสะท้อนแสงเลเซอร์ที่เกิดจากการฉายแสงเลเซอร์จากอุปกรณ์ชี้เป้าไปกระทบบนเป้าหมาย แล้วสะท้อนกลับไปยังเครื่องรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบติดตามเป้าหมาย การสะท้อนแสงเลเซอร์ของเป้าหมายจะดีหรือเลวขึ้นอยู่กับขนาดของเป้าหมาย รูปทรงของเป้าหมาย วัสดุที่เป็นเป้าหมาย นอกจากนั้น สิ่งที่เราจะต้องคำนึงถึงเพิ่มเติมในการชี้เป้าหมาย คือ ขนาดพลังงานของแสงเลเซอร์ ระยะทางจากจุดชี้เป้าไปยังเป้า และจากเป้าไปยังระบบติดตามเป้าหมาย ชนิดหรือความถี่ของแสงเลเซอร์ มุมที่ชี้เป้าและรับ

สัญญาณ ตลอดจนความไวของเครื่องรับสัญญาณแสงเลเซอร์ ดังนั้น ในการนำระบบไปใช้งานจริงจะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวด้วย

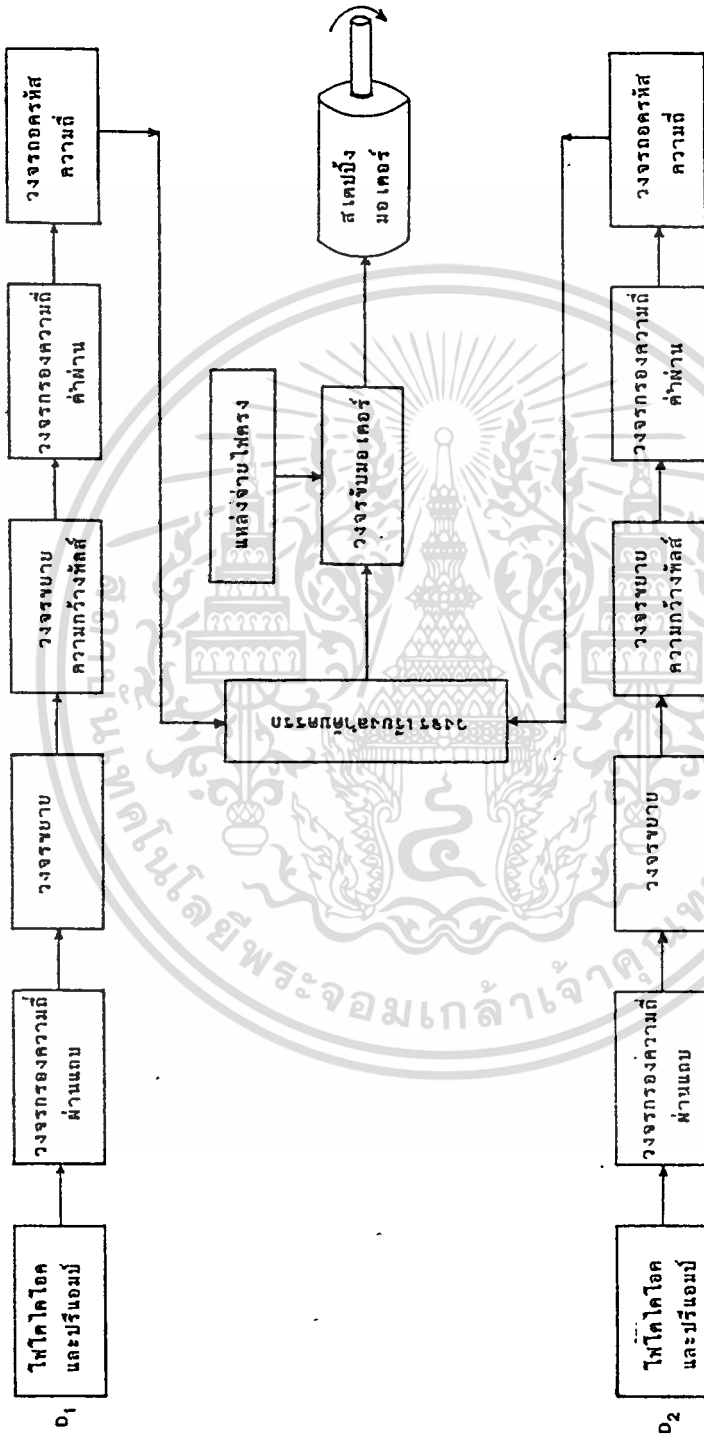
### 2.3 ระบบติดตามเป้าหมาย

ระบบติดตามเป้าหมายเป็นระบบหลักที่เราเน้นศึกษาเป็นพิเศษ ระบบนี้ประกอบไปด้วยตัวรับสัญญาณแสง ซึ่งเป็นโฟโตไดโอด (photodiode) 4 ตัว แต่ละตัวทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำไปขยายและกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการออก สัญญาณที่ได้รับการขยายแล้วจะถูกนำไปเปลี่ยนรูปร่างและถอดรหัส (decode) เพื่อให้ทราบว่าสัญญาณที่รับได้นั้นเป็นสัญญาณชนิดเดียวกันกับสัญญาณที่ใช้ชี้เป้าหรือไม่ และตำแหน่งที่สะท้อนสัญญาณแสงนั้นอยู่ในทิศทางใดของระบบ ข้อมูลนี้จะถูกส่งไปยังภาคควบคุมระบบเพื่อควบคุมให้ระบบหันเข้าหาเป้าหมายที่กำลังถูกชี้ ในระบบติดตามเป้าหมายจะมีชุดควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ของระบบอยู่ 2 ชุด ชุดแรกจะควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ของระบบให้สามารถหันไป-มาได้ ในแนวแกนหนึ่ง เช่น ในแนวแกนตั้ง ส่วนอีกชุดหนึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ของระบบให้สามารถหันไป-มาได้ ในแนวแกนที่ตั้งฉากกับแนวแกนการเคลื่อนที่ของชุดแรก การเชื่อมโยงภาคต่าง ๆ รวมเข้าเป็นระบบติดตามเป้าหมายสำหรับชุดควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ใน 1 แกน ดังแสดงในรูปที่ 11 ลักษณะของสัญญาณแสงจากรูปที่ 5 เมื่อผ่านวงจรภาคต่าง ๆ ของระบบติดตามเป้าหมายจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 12

#### 2.3.1 ตัวรับสัญญาณแสง (Photo Detector)

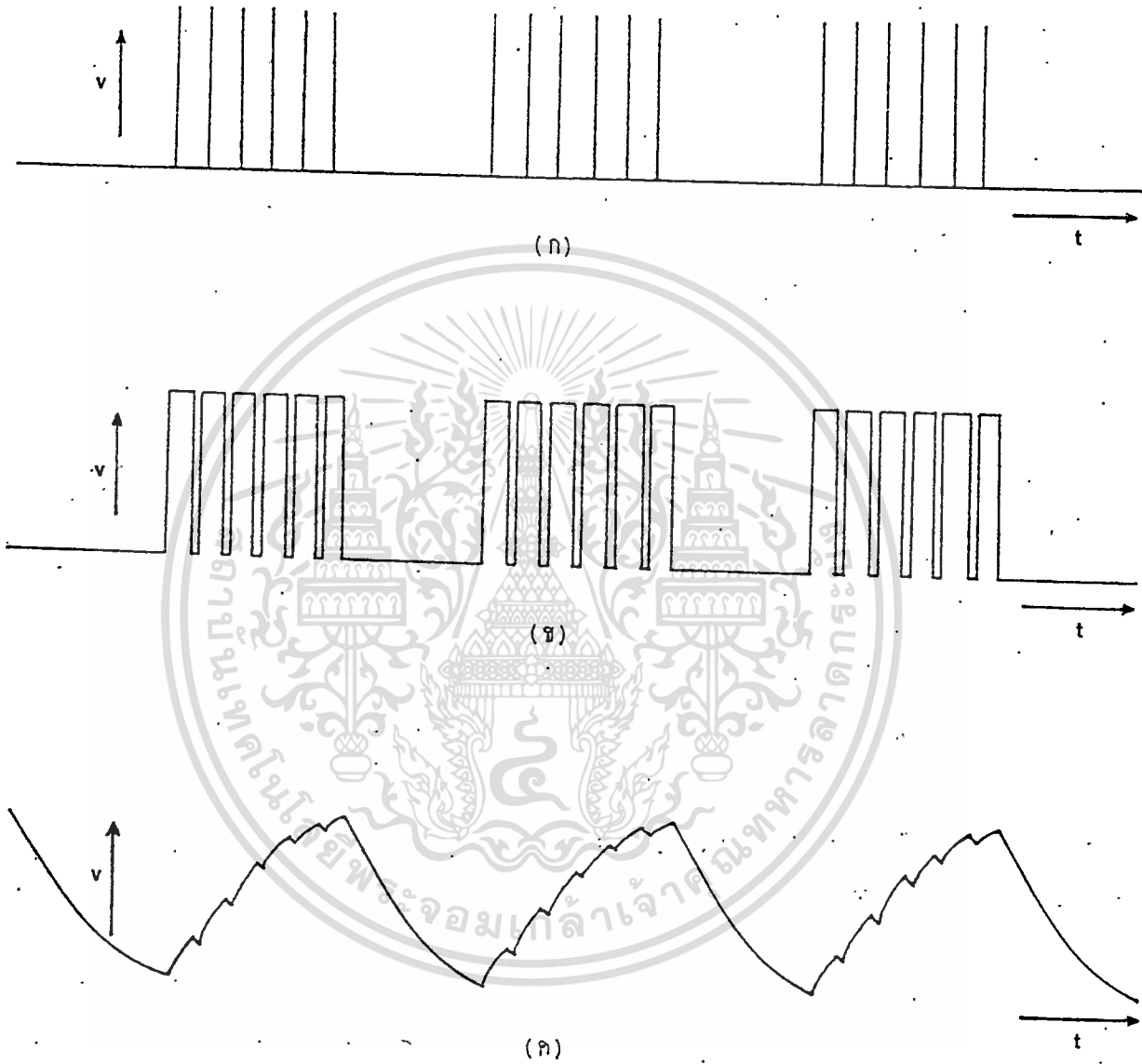
ตัวรับสัญญาณแสงเป็นส่วนแรกของเครื่องรับสัญญาณแสงในระบบติดตามเป้าหมาย เมื่อมีสัญญาณแสงมาตกกระทบบนตัวมัน กำลังงานของแสง (optical power) เหล่านั้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดสอดคล้องกัน [7], [8] เนื่องจากสัญญาณแสงที่สะท้อนออกมาจากเป้าหมายมีขนาดต่ำมาก การใช้ตัวรับสัญญาณแสงที่มีขีดความสามารถสูงมาก ๆ จึงเป็นสิ่งที่ต้องการ ตัวรับสัญญาณแสงที่ดีนั้นต้องมีการตอบสนองและความไวสูงต่อช่วงความยาวคลื่นของแสงที่กำลังใช้งาน มีความเร็วของการตอบสนองต่อสัญญาณได้ดี หรือมีความกว้างของแถบการรับสัญญาณ (band width) เพียงพอกับอัตราการส่งสัญญาณที่ต้องการ ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ให้สัญญาณรบกวนน้อย มีขนาดเหมาะสมกับความต้องการ ราคาไม่แพงจนเกินไป และมีอายุการใช้งานยาวนาน

ตัวรับสัญญาณแสงที่สร้างขึ้นใช้งานในปัจจุบันมีหลายแบบหลายชนิด แต่ชนิดที่จะกล่าวถึงและนำมาใช้งานเป็นโฟโตไดโอดชนิด pin โฟโตไดโอดชนิดนี้เป็นโฟโตไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำ ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p และสารกึ่งตัวนำชนิด n สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกแยกออกจากกันโดยพื้นที่ของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ i



รูปที่ 11. แผนผังการเชื่อมโยงระบบต่าง ๆ รวมเข้าเป็นระบบติดตามเป้าหมาย สำหรับชุดควบคุมการเคลื่อนที่ใน 1 แกน

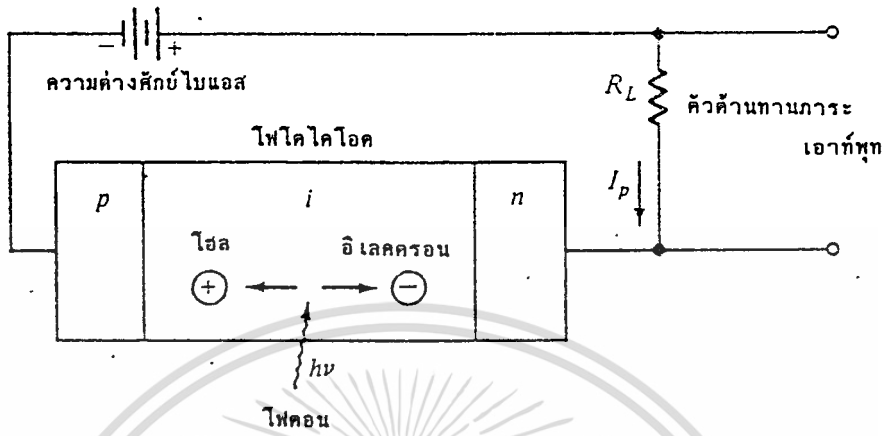
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



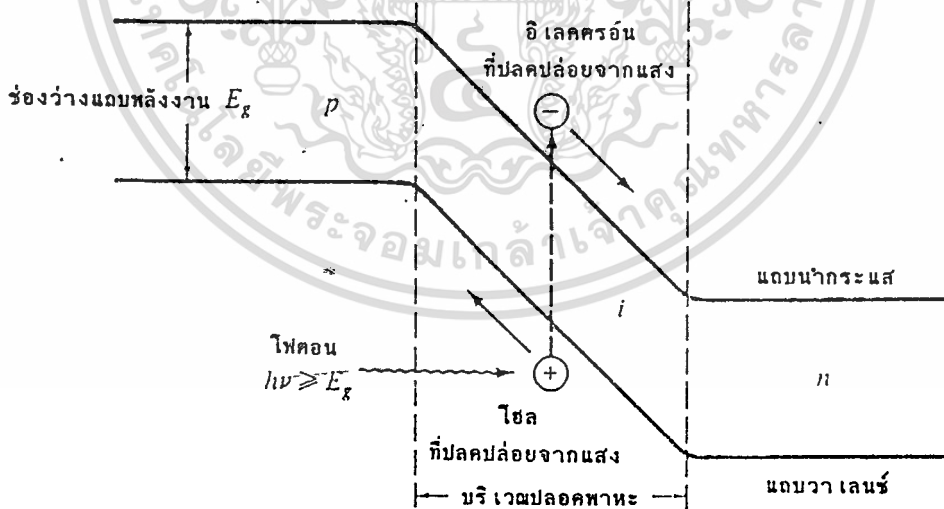
- รูปที่ 12. (ก) ลักษณะของสัญญาณเมื่อผ่านออกจากภาคขยายสัญญาณ  
 (ข) ลักษณะของสัญญาณ เมื่อผ่านออกจากภาคขยายความกว้างของสัญญาณเข้าไปสู่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน  
 (ค) ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคกรองความถี่ต่ำผ่าน เข้าไปสู่ภาคถอดรหัส (tone decoder)

(intrinsic region) ซึ่งเกิดจากการโด๊ป (dope) สารชนิด  $n$  ลงไปในบริเวณนี้ อย่างเบาบาง การใช้งานโดยทั่วไปของโฟโตไดโอดชนิดนี้ดังแสดงในรูปที่ 13 โฟโตไดโอดจะถูกไบแอสกลับ (reverse bias) ด้วยค่าความต่างศักย์ที่มากพอซึ่งจะทำให้บริเวณเนื้อสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์  $i$  ปลอดจากพาหะ (carriers) นั่นคือในบริเวณสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์  $i$  นี้ ทั้งพาหะชนิด  $n$  และพาหะชนิด  $p$  มีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณสารเจือปนที่มีอยู่ในบริเวณนี้

เมื่อแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของแถบช่องว่าง (band gap energy) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำโฟโตไดโอดนั้น แสงจะถ่ายทอดพลังงานไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band) ให้ขึ้นไปสู่แถบการนำกระแส (conduction band) ขบวนการนี้จะทำให้เกิดการปลดปล่อยคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล (hole) อิสระขึ้นมากมาย เนื่องจากมันเป็นพาหะของประจุที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยใช้แสง จึงเรียกว่า พาหะที่เกิดจากแสง (photocarriers) ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยทั่วไปแล้วพาหะที่เกิดจากแสงจะถูกปลดปล่อยออกมาจากบริเวณปลอดพาหะภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (the intrinsic region) ที่ซึ่งแสงที่ตกกระทบบนส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนเอาไว้ และเนื่องจากบนรอยต่อ  $pn$  ได้รับการไบแอสกลับจึงมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในบริเวณปลอดประจุขนาดมากพอที่จะทำให้พาหะที่เกิดจากแสงในบริเวณนั้นแต่ละคู่แยกออกจากกัน และพาหะชนิดเดียวกันจะไหลรวมไปในทิศทางเดียวกันขึ้นอยู่กับชนิดของประจุและทิศทางของสนามไฟฟ้า นั่นคือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อในทิศทางจากขั้วด้าน  $p$  ไปทางด้าน  $n$  ส่วนโฮลจะมีทิศทางไหลกลับด้านกับอิเล็กตรอนสำหรับทุก ๆ คู่ของพาหะที่ถูกปลดปล่อยออกมานั้นการไหลของอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรรภายนอก กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกรณีนี้เรียกว่า กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (photocurrent) ในขณะที่พาหะของประจุไหลผ่านสารกึ่งตัวนำของโฟโตไดโอด จะมีบางคู่ของอิเล็กตรอนกับโฮลรวมตัวกันขึ้นทำให้พาหะที่มีประจุอิสระหายไป ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางที่พาหะประจุใช้ในการเคลื่อนที่ (diffusion length) และระยะเวลาสำหรับอิเล็กตรอนหรือโฮลแต่ละตัวใช้ในการรวมตัวกัน (carrier lifetime) ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยเนื้อสารกึ่งตัวนำที่ส่งความยาวคลื่นหนึ่งขึ้นอยู่กับระดับกำลังงานของแสงที่ตกกระทบบน ระยะทางภายในเนื้อสารที่แสงนั้นถูกดูดกลืนและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนั้น (absorption coefficient) ถ้าให้  $I_p$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดจากแสงที่มีกำลังงานเฉลี่ย  $P_o$  ตกกระทบบนตัวรับสัญญาณแสง จะได้



รูปที่ 13. วงจรของโฟโตไดโอดชนิด pin ที่ได้รับการไบแอสกลับ



รูปที่ 14. แสดงรูปแบบอย่างง่าย ๆ ของแถบพลังงานสำหรับโฟโตไดโอดชนิด pin โฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงาน  $E_g$  สามารถทำให้เกิดการปลดปล่อยคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลอิสระซึ่งเป็นพาหะของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง

$$I_p = \eta \frac{qP_0}{h\nu} \quad (2)$$

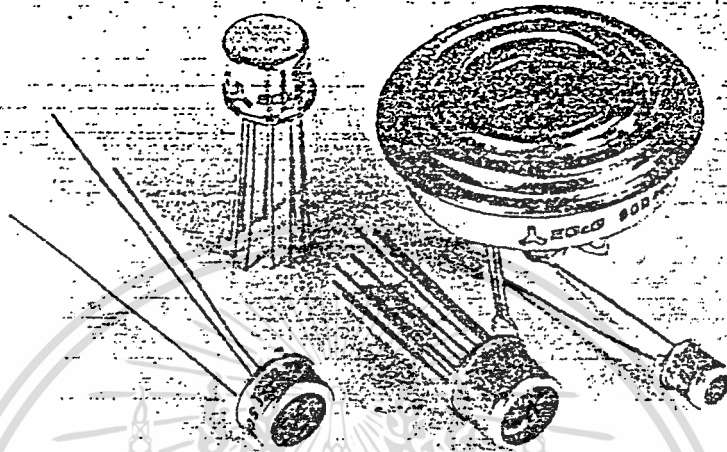
เมื่อ  $\eta$  คือ ค่าประสิทธิภาพทางควันตัม (quantum efficiency) ซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นเนื่องจากโฟตอนที่ให้พลังงานเท่ากับ  $h\nu$  ตกกระทบบนตัวรับสัญญาณ  $q$  คือประจุไฟฟ้าบนอิเล็กตรอนแต่ละตัว  $h$  คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) และ  $\nu$  คือ ความถี่ของแสงที่ตกกระทบบน

ในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบจะมีชุดรับสัญญาณแสง 4 ชุด นั่นคือ จะมีโฟโตไดโอด 4 ตัว ติดตั้งบนแนวแกนที่ตั้งฉากกัน 2 แนว แนวแกนละ 2 ตัว โดยมีจุดตัดของแนวแกนทั้งสองเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างโฟโตไดโอด 2 ตัวในแต่ละแนว ดังแสดงในรูปที่ 16 โฟโตไดโอดแต่ละตัวจะถูกติดตั้งให้รับสัญญาณได้จากเฉพาะด้านที่ตัวเองติดตั้งอยู่เท่านั้น จะรับสัญญาณที่สะท้อนมาจากฝั่งตรงกันข้ามไม่ได้ พิจารณาจากรูปที่ 16 ถ้าสมมุติให้  $D_1, D_2, D_3$  และ  $D_4$  เป็นโฟโตไดโอด 4 ตัว ที่ติดตั้งไว้ทางด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวา ของระบบตามลำดับ ถ้าจุดที่สะท้อนสัญญาณอยู่ในแนวตรงหน้าของระบบพอดี โฟโตไดโอดทั้ง 4 ตัว จะรับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้าหมายนั้นได้ ถ้าสัญญาณแสงสะท้อนมาจากทางทิศด้านบนของระบบ โฟโตไดโอด  $D_1$  จะรับสัญญาณได้เพียงตัวเดียว ถ้าสัญญาณแสงสะท้อนมาจากทิศทางด้านล่างซ้ายของระบบ โฟโตไดโอด  $D_2$  และ  $D_3$  เท่านั้น ที่รับสัญญาณที่สะท้อนมานั้นได้ ลักษณะการคลุมพื้นที่ที่สามารถรับสัญญาณแสงสะท้อนจากเป้าของโฟโตไดโอดแต่ละตัว เมื่อมองจากระบบติดตามเป้าหมายออกไป และเมื่อมองทางด้านข้างของระบบจะมีลักษณะดังรูปที่ 17 ถ้าให้โฟโตไดโอดแต่ละตัวมีมุมที่สามารถมองหาเป้าหมายได้ (angle of view) เท่ากับ  $\theta$  และ  $r$  คือรัศมีของการคลุมพื้นที่ที่สามารถรับสัญญาณแสงได้ของโฟโตไดโอดแต่ละตัวที่ระยะทาง  $d$  ห่างจากระบบติดตามเป้าหมายออกไป จะได้

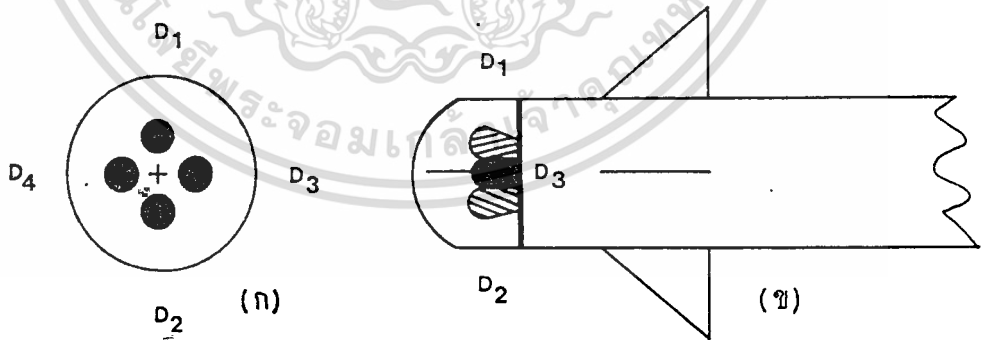
$$r = d \tan \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

ถ้าให้มุมมองดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $9$  องศา ที่ระยะห่างออกไปจากระบบติดตามเป้าหมาย 2 กิโลเมตร พื้นที่การรับสัญญาณของโฟโตไดโอดแต่ละตัวจะมีรัศมีเท่ากับ 157.4 เมตร

เมื่อฉายแสงเลเซอร์จากชุดอุปกรณ์ซึ่งเข้าไปยังเป้าหมาย แสงที่สะท้อนออกจากเป้าหมายจะมีลักษณะ เป็นจุดหรือพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างเป้าหมายถึงระบบติดตามเป้าหมาย และเนื่องจากระยะทางระหว่างเป้าหมายถึงระบบติดตามเป้าหมายไกลมากเมื่อเทียบกับขนาดของโฟโตไดโอดแต่ละตัวที่ติดตั้งบนระบบติดตามเป้า

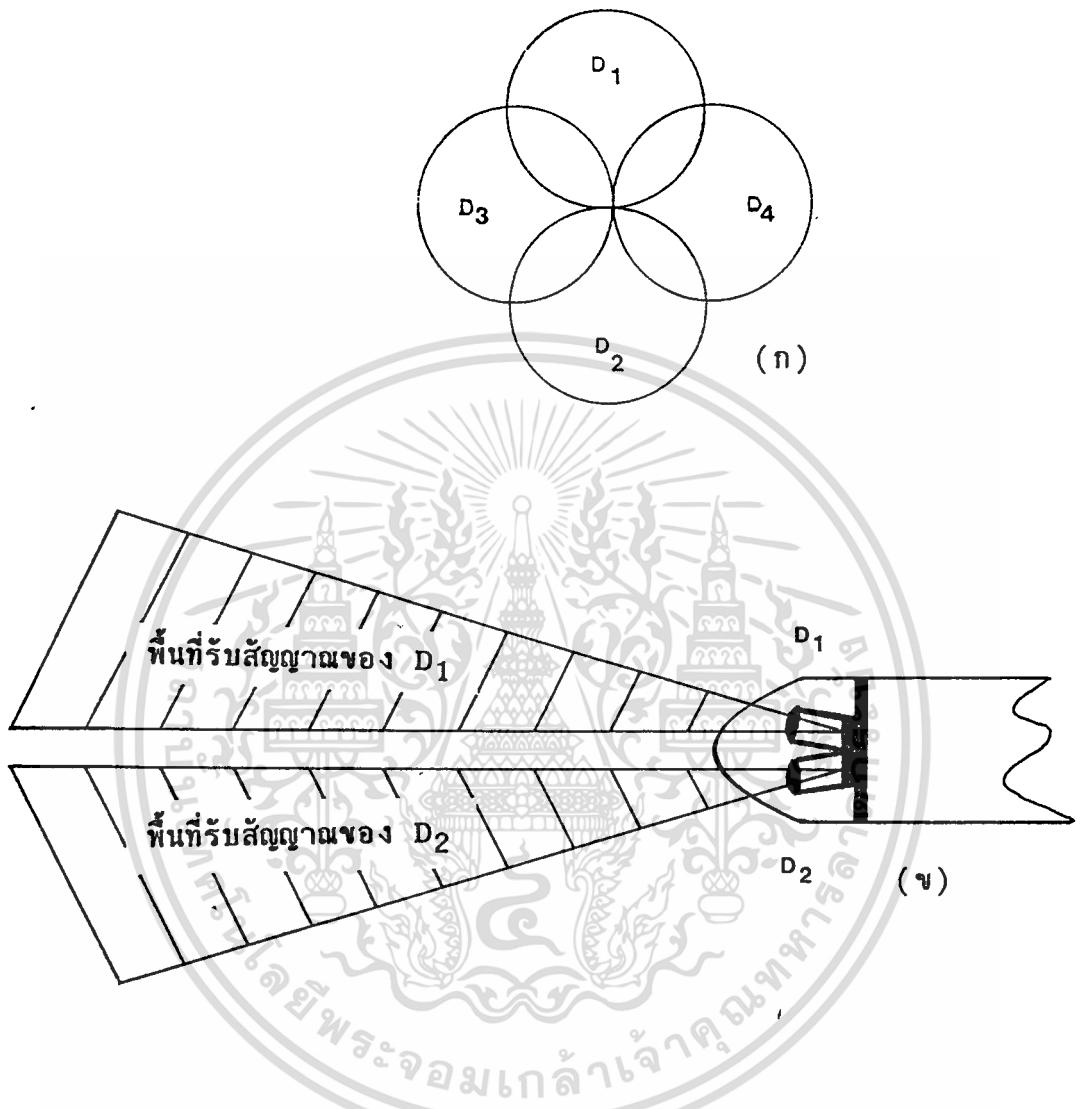


รูปที่ 15. ตัวอย่างของโฟโตไดโอดแบบที่ผลิตขึ้นใช้งาน

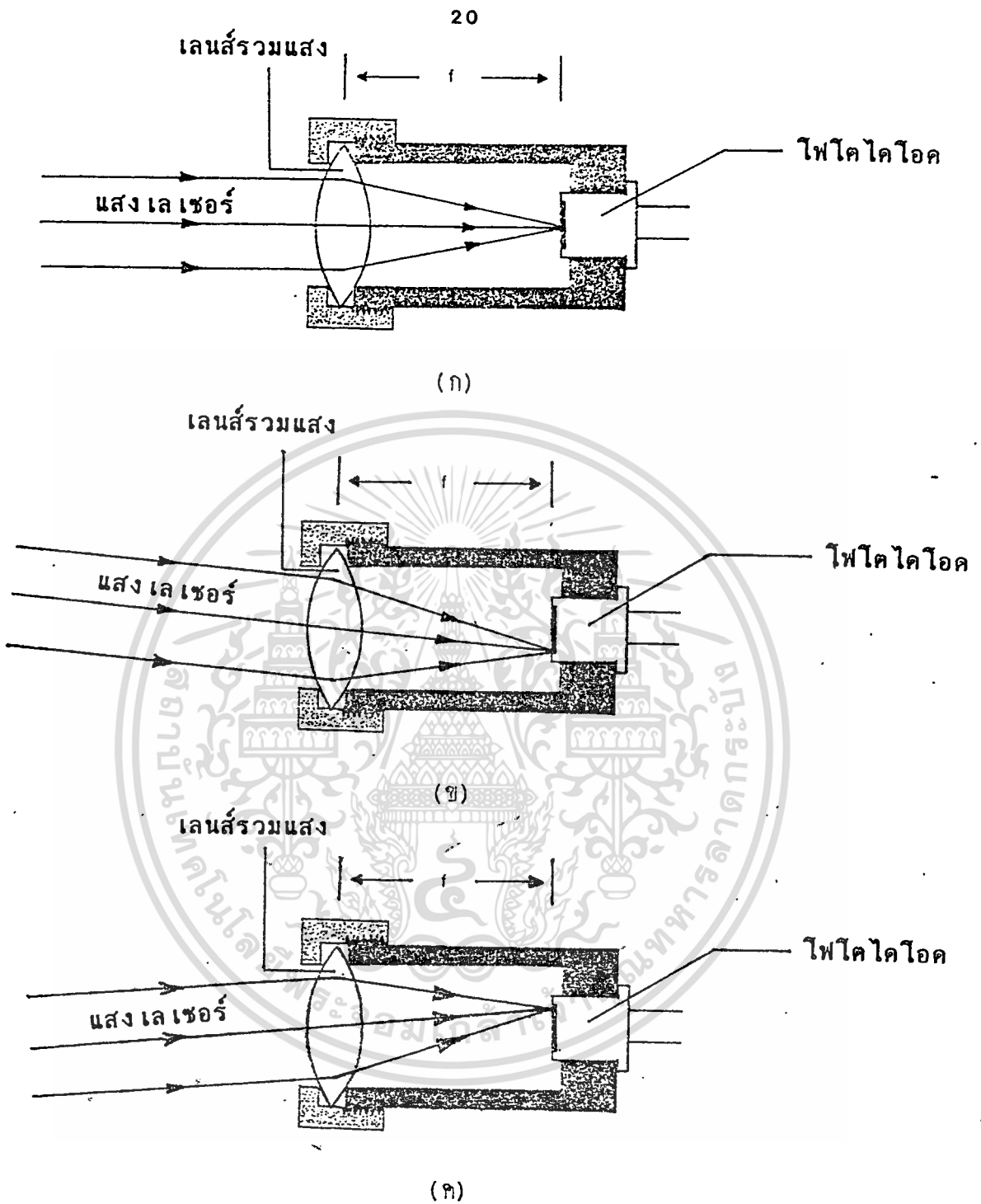


รูปที่ 16. การติดตั้งโฟโตไดโอด 4 ตัว บนระบบติดตามเป้าหมาย  
 (ก) เมื่อมองจากทางด้านหน้า  
 (ข) เมื่อมองจากทางด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 17. ลักษณะการคลุมพื้นที่ที่สามารถรับสัญญาณแสงสะท้อนจากเป้า  
 (ก) ของโฟโตไดโอดแต่ละตัวเมื่อมองจากระบบติดตาม  
 เป้าหมายออกไป  
 (ข) ของโฟโตไดโอดสองตัวที่ติดตั้งอยู่ทางด้านตรงกันข้าม  
 เมื่อมองจากทางด้านข้าง



รูปที่ 18. ลักษณะการติดตั้งเลนส์ และลักษณะของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด  
 (ก) เมื่อลำแสงมาจากทางด้านตรงหน้า  
 (ข) เมื่อลำแสงมาจากทางด้านบน  
 (ค) เมื่อลำแสงมาจากทางด้านล่าง

ตารางที่ 1 การตอบสนองต่อทิศทางการหันของระบบติดตามเป้าหมายเมื่อโฟโตโวลตาอิก  
ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถตรวจจับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าได้

ตำแหน่งโฟโตโวลตาอิกที่ตรวจจับ * สัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าได้				ทิศทางที่ระบบติดตามเป้าหมาย ถูกบังคับให้หันไป			
D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	1
1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	0	1
1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0

\* 1 = รับสัญญาณได้ 0 = รับสัญญาณไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายนั้น ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมายตกกระทบบนโฟโตไดโอดจึงมีลักษณะเป็นลำแสงที่เกือบขนานกัน ลักษณะของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมายเมื่อมองเป็นภาพรวมแล้วจะมีลักษณะบานออกจากเป้าหมายเป็นรูปกรวย ขนาดของโฟโตไดโอดแต่ละตัวมีพื้นที่รับแสงเล็กมาก และอยู่ห่างไกลจากเป้าหมายออกไปมาก สัญญาณแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดจึงมีความเข้มของสัญญาณต่อพื้นที่ต่ำ การเพิ่มความเข้มของสัญญาณแสงให้กับโฟโตไดโอดสามารถกระทำได้โดยใช้เลนส์นูนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่าขนาดของโฟโตไดโอดรวมสัญญาณแสง (focus) ลงบนโฟโตไดโอด การใช้เลนส์นูนเข้ามาช่วยในกรณีนี้จะต้องคำนึงถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาวโฟกัส และชนิดของเนื้อสารที่ใช้ทำเลนส์นั้น ถ้าใช้เลนส์นูนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่มากสัญญาณที่ได้จะมีความเข้มสูง แต่ขนาดและน้ำหนักของระบบจะเพิ่มขึ้น ถ้าเลนส์มีความยาวโฟกัสมาก มุมในการมองหาเป้าจะน้อยกว่าเมื่อเลนส์นั้นมีความยาวโฟกัสน้อย แต่เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสน้อยจะมีความหนามากกว่าเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสมาก เมื่อใช้สารที่ทำเลนส์ชนิดเดียวกัน และอาจจำกัดด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ด้วย เลนส์ที่มีความหนาอาจจะบั่นทอนความเข้มสัญญาณให้ลดน้อยลง ในขณะที่สัญญาณผ่านเลนส์ไปยังโฟโตไดโอด เนื้อสารที่ใช้ทำเลนส์มีผลต่อการสะท้อนแสงและดูดกลืนแสงบางความถี่ ทำให้สัญญาณที่โฟโตไดโอดได้รับเบาบาง เทคนิคในการเคลือบผิวเลนส์ป้องกันการสะท้อนของแสงในความถี่ย่านที่ใช้งาน ตลอดจนการเลือกชนิดของเนื้อสารที่ใช้ทำเลนส์เป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วย ทั้งนี้เพื่อลดการบั่นทอนสัญญาณแสงในย่านความถี่แสงที่ต้องการใช้งาน ในขณะที่แสงนั้นตกกระทบบนและผ่านเลนส์ไปยังโฟโตไดโอด ลักษณะของการติดตั้งเลนส์ และลักษณะของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด เมื่อแสงมีทิศทางต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 18 ถ้าให้จุดที่สะท้อนแสงจากเป้าอยู่ห่างจากเลนส์เป็นระยะทาง  $u$  สะท้อนแสงผ่านเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส  $f$  ทำให้เกิดภาพของจุดสะท้อนแสงบนโฟโตไดโอดที่ระยะห่างจากเลนส์  $v$  จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (4)$$

เนื่องจากระยะเป้าถึงเลนส์อยู่ห่างกันมากเมื่อเทียบกับความยาวโฟกัสของเลนส์ ดังนั้นจะได้

$$\frac{1}{f} \approx \frac{1}{v} \quad (5)$$

$$\text{นั่นคือ} \quad v = f \quad (6)$$

จะได้ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดกับเลนส์ใกล้เคียงกับความยาวโฟกัสของเลนส์มาก

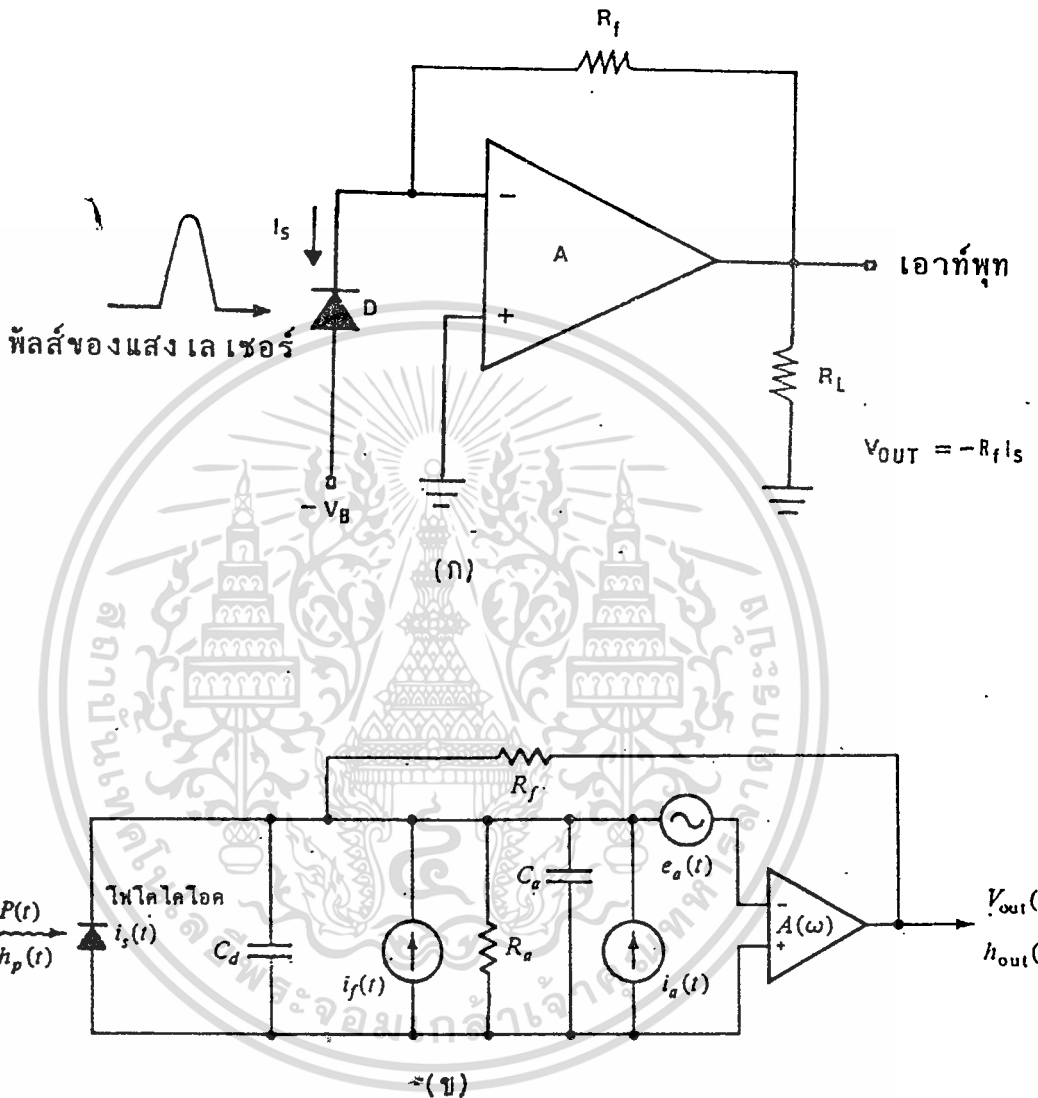
เมื่อสัญญาณแสงตกกระทบบนโฟโตไดโอดแล้ว สัญญาณแสงนั้นจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะและขนาดสอดคล้องกับสัญญาณนั้น สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะถูกขยายและถอดรหัส แล้วส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุม เพื่อควบคุมให้ระบบติดตามเป้าหมายหันไปหาเป้าหมายที่กำลังถูกชี้ การตอบสนองของระบบติดตามเป้าหมายต่อเป้าหมายที่ถูกตรวจจับได้ขึ้นกับค่าแห่งของโฟโตไดโอดที่ตรวจจับสัญญาณได้ จากรูปที่ 16 ถ้าโฟโตไดโอดทั้ง 4 ตัว รับสัญญาณแสงได้พร้อมกัน หรือทั้ง 4 ตัว ไม่สามารถได้รับสัญญาณพร้อมกัน ระบบติดตามเป้าหมายจะพยายามรักษาทิศทางเดิมไว้ คือ ทิศตรงหน้า ถ้าโฟโตไดโอดตัวหนึ่ง หรือมากกว่ารับสัญญาณแสงได้ ระบบติดตามเป้าหมายจะถูกควบคุมให้หันไปทางด้านที่โฟโตไดโอดนั้นรับสัญญาณได้เพื่อหันให้โฟโตไดโอดทั้ง 4 ตัว รับสัญญาณแสงได้พร้อมกัน เมื่อโฟโตไดโอดทั้ง 4 ตัวรับสัญญาณแสงได้พร้อมกันแล้วระบบจะรักษาทิศทางนี้เอาไว้ และค่าแห่งของเป้าหมายที่ถูกชี้จะอยู่ในทิศตรงหน้าของระบบ ตัวอย่างเช่นถ้าโฟโตไดโอด  $D_1$  และ  $D_3$  รับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้าได้ ระบบติดตามเป้าหมายจะถูกควบคุมให้หันไปทางด้าน  $D_1$  และ  $D_3$  จนกว่า  $D_1, D_2, D_3$  และ  $D_4$  จะรับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้าได้พร้อมกันหมด ระบบนี้จึงจะรักษาทิศทางไว้ไม่หันไปทางใดอีกต่อไป การหันของระบบติดตามเป้าหมายจะถูกควบคุมให้หันไปมาได้ใน 2 แนวที่ตั้งฉากกัน คือ หันไปมาในแนว  $D_1D_2$  และหันไปมาในแนว  $D_3D_4$  ความสัมพันธ์ของการตอบสนองของระบบติดตามเป้าหมายต่อเป้าหมายที่ถูกตรวจจับได้ด้วยโฟโตไดโอดค่าแห่งต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

### 2.3.2 ภาคเตรียมการขยายสัญญาณ (Preamplifier)

ภาคเตรียมการขยายสัญญาณทำหน้าที่ขยายสัญญาณต่าง ๆ ที่เข้ามาในภาคนี้ เพื่อให้ขนาดของสัญญาณที่ออกมามีขนาดโตมากพอก่อนที่จะส่งผ่านสัญญาณนี้ไปกรองหรือแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกแล้วส่งผ่านสัญญาณที่ต้องการเข้าสู่ภาคขยายสัญญาณ เพื่อให้ขนาดของสัญญาณเพียงพอกับความต้องการใช้งาน เนื่องจากโฟโตไดโอดที่ใช้รับสัญญาณแสงทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณของกระแสไฟฟ้า ภาคเตรียมการขยายสัญญาณที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกรณีนี้ เป็นวงจรถยายสัญญาณแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ (transimpedance amplifier) [7],[9],[10] สัญญาณที่เข้าสู่ทางด้านอินพุต (input) ของวงจรถยายสัญญาณแบบนี้จะอยู่ในรูปของสัญญาณกระแสไฟฟ้า และสัญญาณ

ที่ออกมาทางด้านเอาต์พุต (output) จะอยู่ในรูปของความต่างศักย์ (voltage) นั่นคือ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function) ของวงจรนี้จะอยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ (impedance) ข้อดีของการใช้วงจรขยายสัญญาณแบบนี้ คือมีอัตราขยายสูง (high-gain) มีความต้านทานด้านอินพุตสูง มีการป้อนกลับเข้าสู่อินพุตของวงจรขยายผ่านตัวต้านทานป้อนกลับ (feedback resistor) ทำให้มีสัญญาณรบกวนน้อย มีพิสัยพลวัต (dynamic range) กว้าง มีความต้านทานทางด้านเอาต์พุตต่ำ ทำให้วงจรไม่มีความไวต่อการเกิดสัญญาณรบกวน (noise) เสียงแทรก (cross talk) การสอดแทรกทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ คุณลักษณะของการทรานสเฟอร์ (transfer characteristic) ของวงจรขยายแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าทรานสอิมพีแดนซ์ของมันซึ่งก็คือค่าตัวต้านทานป้อนกลับ ทำให้ง่ายต่อการควบคุม และมีเสถียรภาพ (stable) สูง ในภาคการทดสอบได้ใช้ไฟโตไดโอดที่มีออปแอมป์ (operational amplifier) อยู่ในตัว เบอร์ FHD-1100 ของ EG&G [ผนวก ก] การประกอบวงจรดังรูปที่ 19 (ก) ไฟโตไดโอดและออปแอมป์จะอยู่ในชิพ (chip) อันเดียวกัน ส่วนตัวต้านทานที่ทำหน้าที่ป้อนกลับ  $R_f$  เป็นองค์ประกอบภายนอก มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ ไฟโตไดโอดจะถูกไบแอสกลับด้าน ด้วยความต่างศักย์  $-V_B$  และต่อเข้ากับออปแอมป์ ให้ขยายสัญญาณที่ได้แบบกลับขั้วสัญญาณ (inverting amplifier) ออปแอมป์ที่ใช้ทำงานมีความกว้างของแถบขยายความถี่จากความถี่ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จนถึงความถี่ 1.2 กิกะเฮิรตซ์ ( $\text{GHz}$ ) มีอัตราขยายแบบวงรอบเปิด (open loop gain) เท่ากับ 300 เมื่อสัญญาณแสงตกกระทบบนไฟโตไดโอดจะถูกเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า  $I_S$  ไหลผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบทรานสอิมพีแดนซ์ได้ความต่างศักย์ทางด้านเอาต์พุตเป็น  $V_o$

พิจารณาจากรูปที่ 19 (ข) ซึ่งเป็นวงจรสมมูลย์ของวงจรขยายสัญญาณแบบทรานสอิมพีแดนซ์ [7], [9] ในรูปที่ 19 (ก) ประกอบไปด้วย ความต้านทานป้อนกลับ  $R_f$  พร้อมด้วยกระแสรบกวนเนื่องจากความร้อน (thermal noise current)  $i_f(t)$  ที่สมมูลย์กันต่อชั้นที่ (shunt) กับด้านอินพุต ในส่วนของภาคเตรียมการขยายสัญญาณ (preamplifier) จะถูกจำลองให้มีอัตราขยายแบบวงรอบเปิดที่ปราศจากสัญญาณรบกวน (noiseless open-loop gain) เป็น  $A(\omega)$  ในกรณีนี้ สัญญาณรบกวนของการขยายสัญญาณทางด้านอินพุตของวงจรขยายจะถูกแทนด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนชนิดความต่างศักย์ (voltage noise source)  $e_a(t)$  ต่ออนุกรมเข้าทางด้านอินพุต และแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนชนิดกระแสไฟฟ้า (current noise source)  $i_a(t)$  ต่อชั้นที่ (shunt) กับด้านอินพุต อิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตของภาคนี้ หาได้จากผลรวมอิมพีแดนซ์ของ  $R_a$  และ  $C_a$  ที่ต่อขนานกัน ในส่วนของตัวรับสัญญาณแสง



รูปที่ 19. ลักษณะของวงจรในภาคเตรียมการขยายสัญญาณ  
 (ก) วงจรขยายสัญญาณแบบทรานซิสมิกพีแอนด์แอนด์ที่นำมาใช้งาน  
 (ข) ลักษณะวงจรสมมูลย์ของวงจรขยายสัญญาณแบบทรานซิสมิกพีแอนด์แอนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกแทนโดยแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแส  $i_S(t)$  และตัวเก็บประจุ  $C_d$  ซึ่งต่อชั้นที่เข้าทางด้านอินพุท ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของสัญญาณสำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ในรูปที่ 19 (ข) จะเป็นดังนี้

$$H(\omega) = \frac{R_f}{1 + 1/A + R_f/(R_a A) + j\omega R_f C_T/A} \quad (7)$$

$$\text{และ } C_T = C_a + C_d \quad (8)$$

ถ้า  $A$  มีค่ามาก ๆ จะได้

$$\lim_{A \rightarrow \infty} H(\omega) = R_f \quad (9)$$

จากรูปที่ 19 (ก) พบว่าคุณสมบัติของออปแอมป์คือมีอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุทสูงมากแต่อิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุทต่ำมาก มีอัตราขยายแบบวงรอบเปิดสูง สัญญาณที่ผ่านเข้าทางอินพุทอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า  $-i_S$  และสัญญาณที่ออกทางเอาต์พุทอยู่ในรูปของความต่างศักย์  $v_O$  ดังนั้น จากสมการ (9) จะได้

$$\frac{v_O}{-i_S} \approx R_f \quad (10)$$

นั่นคือ

$$v_O \approx -i_S R_f \quad (11)$$

สัญญาณที่ผ่านออกจากภาคเตรียมการขยายสัญญาณจะส่งต่อไปยังภาคกรองความถี่ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออก แล้วนำสัญญาณที่ต้องการไปขยายในภาคขยายสัญญาณ (amplifier) ต่อไป

### 2.3.3 วงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบ (Bandpass Filter)

วงจรกรองความถี่แบบนี้จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่อยู่ในแถบ (band)

ที่ต้องการผ่านไป ส่วนสัญญาณความถี่ที่อยู่นอกแถบดังกล่าวจะถูกกั้นเอาไว้ วงจรที่นำมาใช้งานในกรณีนี้คือวงจร RLC ที่ต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 20 ถ้าให้  $\bar{Z}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรนี้ จะได้

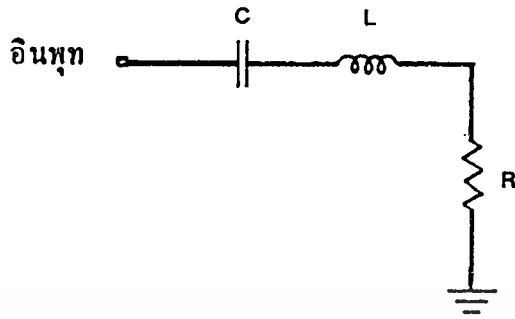
$$\bar{Z} = R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (12)$$

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิมพีแดนซ์  $\bar{Z}$  รีแอกแตนซ์แบบความเหนี่ยวนำ (inductive reactance) รีแอกแตนซ์แบบความจุ (capacitive reactance) ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันของความถี่ดังแสดงในรูปที่ 21 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลในวงจร RLC ที่ต่ออนุกรมกันที่ความถี่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 22 การนำวงจรนี้มาใช้งานอาศัยหลักการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (series resonance) ภายในวงจรที่ความถี่เรโซแนนซ์  $\omega_0$  วงจรนี้จะมีอิมพีแดนซ์ต่ำสุด และมีกระแสไหลผ่านวงจรมากที่สุด นั่นคือ กระแสจะไหลผ่านความต้านทาน R มากที่สุดเช่นเดียวกัน จากสมการ (12) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ จะได้

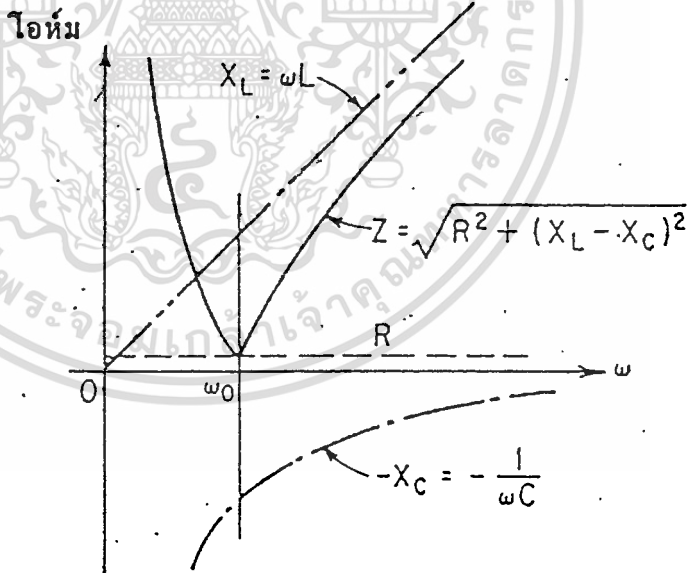
$$\bar{Z} = R \quad (13)$$

$$\text{และ } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (14)$$

จากรูปที่ 20 และจากสมการ (14) ถ้าให้ R เป็นความต้านทานทางด้านเอาต์พุตของภาคนี้ และ  $\omega_0$  เป็นความถี่ของสัญญาณที่เราต้องการใช้งานและให้ผ่านออกทางเอาต์พุตมากที่สุด เราสามารถใช้สมการที่ (14) คำนวณหาค่า L และ C ที่เหมาะสมในกรณีนี้ได้ ให้  $P_0$  คือ กำลังที่วงจรจ่ายให้กับความต้านทาน R ขณะเกิดเรโซแนนซ์ ช่วงความถี่ที่วงจรจ่ายกำลังให้กับความต้านทาน R มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $P_0/2$  เรียกว่า แบนด์วิดท์ (bandwidth) ของวงจรอนุกรม RLC จากลักษณะเส้นกราฟของการเกิดเรโซแนนซ์ในรูปที่ 22 พิจารณาเส้นกราฟสำหรับกรณี  $\omega_0 L/R = 1/2$  จะเห็นว่ามีความถี่อยู่ 2 ค่าที่วงจรจ่ายกำลังให้ความต้านทาน R มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของกำลังที่จ่ายให้ R ที่ความถี่เรโซแนนซ์ คือ ที่ความถี่  $\omega_1$  ซึ่งเรียกว่าจุดครึ่งกำลังทางด้านต่ำ (lower half-power point) และที่ความถี่  $\omega_2$  ซึ่งเรียกว่าจุดครึ่งกำลังทางด้านสูง (upper half-power point) จะได้แบนด์วิดท์  $\omega_{bw}$  เท่ากับ  $\omega_2 - \omega_1$

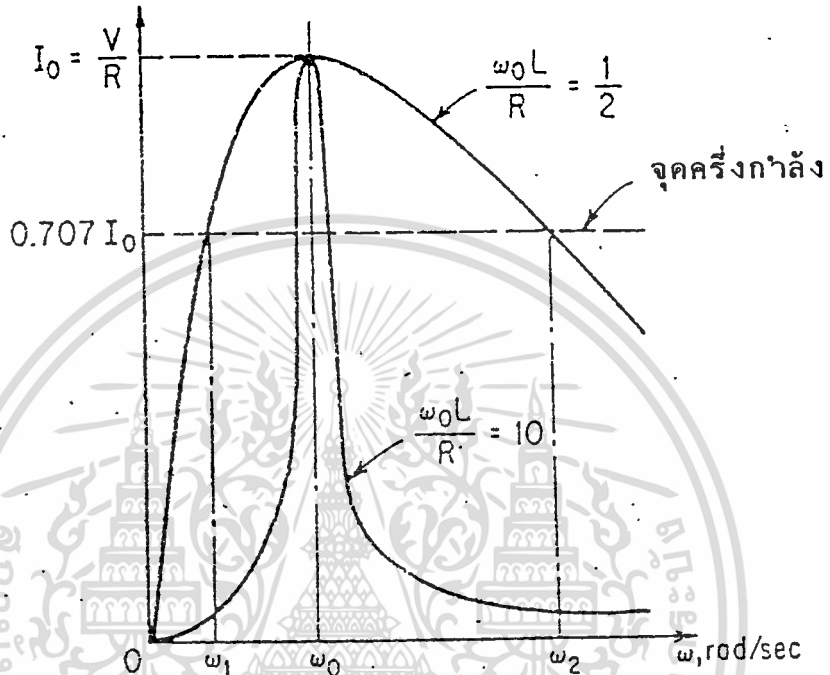


รูปที่ 20. วงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบ RLC



รูปที่ 21. ความสัมพันธ์ระหว่าง อิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) รีแอกแตนซ์แบบความเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) รีแอกแตนซ์แบบความจุ ( $X_C$ ) กับความถี่ ( $\omega$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22. การเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจร RLC ที่ต่อกันแบบอนุกรมที่ความถี่ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้  $I_1$  เป็นกระแสที่ไหลผ่าน  $R$  ที่ความถี่  $\omega_1$   $I_0$  เป็นกระแสที่ไหลผ่าน  $R$  ที่ความถี่ เรโซแนนซ์  $\omega_0$  และ  $I_2$  เป็นกระแสที่ไหลผ่าน  $R$  ที่ความถี่  $\omega_2$  จะได้

$$I_1^2 R = \frac{1}{2} I_0^2 R = I_2^2 R \quad (15)$$

$$\text{นั่นคือจะได้} \quad I_1 = I_2 = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0.707 I_0 \quad (16)$$

จากสมการ (16) แสดงให้เห็นว่า กระแสที่ไหลผ่านวงจรที่จุดครึ่งกำลัง มีค่าเท่ากับ  $I_0/\sqrt{2}$  นั่นคือ ขนาดของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่จุดนี้จะมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{2}R$  และ เราจะได้ขนาดของรีแอกแตนซ์ของวงจรที่จุดครึ่งกำลังทางด้านความถี่ต่ำ  $X_1$  ดังนี้

$$X_1 = \omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} = -R \quad (17)$$

เครื่องหมายลบที่ปรากฏอยู่ทางด้านขวามือของสมการ หมายถึง ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ เรโซแนนซ์ ค่ารีแอกแตนซ์แบบความจุ มีขนาดมากกว่าค่ารีแอกแตนซ์แบบความเหนี่ยวนำ จัดเรียงสมการ (17) ใหม่ จะได้

$$\omega_1^2 + \frac{R}{L} \omega_1 - \frac{1}{LC} = 0 \quad (18)$$

รากของสมการ (18) จะเป็นดังนี้

$$\omega_1 = \frac{-\frac{R}{L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}}{2} \quad (19)$$

จากสมการ (14) เขียนสมการ (19) ใหม่ จะได้

$$\omega_1 = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} \quad (20)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \alpha = \frac{R}{2L} \quad (21)$$

เนื่องจากในความเป็นจริง ความถี่มีค่าเป็นบวกเท่านั้น ดังนั้น จากสมการ (20) จะ ได้

$$\omega_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} \quad (22)$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการ (17) ขนาดของรีแอกแตนซ์ของวงจรที่จุดครึ่งกำลังทางด้านความถี่สูง  $X_2$  จะเป็นดังนี้

$$X_2 = \omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C} = R \quad (23)$$

และจะ ได้

$$\omega_2^2 - \frac{R}{L} \omega_2 - \frac{1}{LC} = 0 \quad (24)$$

ในทำนองเดียวกับสมการ (22) จะ ได้

$$\omega_2 = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} \quad (25)$$

นั่นคือ เราจะหาแบนด์วิดท์  $\omega_{bw}$  ได้จากสมการ (22) และสมการ (25) ดังนี้

$$\omega_{bw} = \omega_2 - \omega_1 = 2\alpha = \frac{R}{L} \quad (26)$$

ดังนั้น แบนด์วิดท์จะกว้างหรือแคบจะขึ้นอยู่กับค่า  $R$  และ  $L$  ที่เหมาะสมในวงจรอนุกรม RLC อัตราส่วนระหว่างค่าความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าแบนด์วิดท์ เรียกว่า ปัจจัยบ่งบอกคุณภาพ (quality factor)  $Q$  ของวงจร RLC นั่นคือ จะ ได้

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_{bw}} \quad (27)$$

จากสมการ (26) และ สมการ (27) จะ ได้

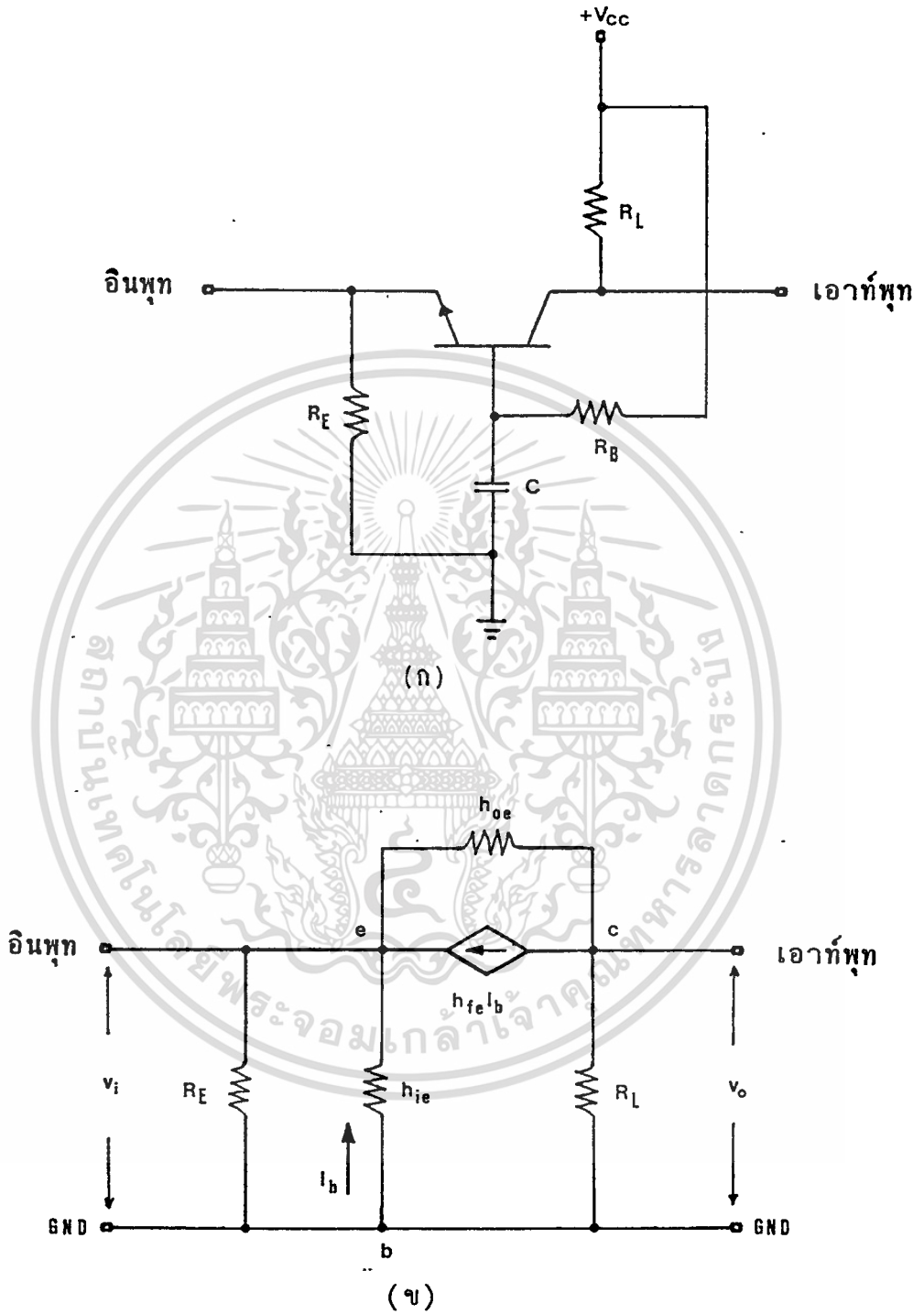
$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (28)$$

จากรูปที่ 22 ค่า  $Q$  จะเป็นตัวกำหนดความแหลมชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความถี่ต่าง ๆ ที่ค่า  $Q = 10$  ให้เส้นกราฟที่มีความแหลมคมกว่ากรณีที่  $Q = 1/2$  นั่นคือ ถ้าค่า  $Q$  ยิ่งมาก ความแหลมคมของกราฟจะมากตามไปด้วย ดังนั้นจึงสามารถนำค่า  $Q$  มาเป็นปัจจัยในการพิจารณาความแหลมคม และความกว้างของแถบความถี่ที่ต้องการให้ผ่านวงจร RLC นี้ได้

การนำคุณสมบัติของการเกิดเรโซแนนซ์ไปใช้ประโยชน์ในวงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบคือ อาศัยความสัมพันธ์จากสมการ (14) ในการเลือกค่า  $L$  และ  $C$  ที่เหมาะสม ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่เราต้องการกรองให้ผ่านไป ความกว้างของแถบความถี่ที่ต้องการให้ผ่านการกรองไปได้กำหนดได้จากแบนด์วิดท์ในสมการ (26) หรือพิจารณาจากค่า  $Q$  ในสมการ(28) สัญญาณที่ผ่านออกจากภาคนี้จะมีขนาดสูงแตกต่างจากสัญญาณรบกวนมาก นำสัญญาณนี้ไปขยายให้มีขนาดตามที่ต้องการแล้วนำไปกรองสัญญาณรบกวนออกอีกครั้งหนึ่ง แล้วผ่านสัญญาณไปยังภาคถัดไป วงจรกรองความถี่แบบนี้จะนำมาใช้ 2 จุด คือ จุดทางด้านเอาต์พุตของภาคเตรียมการขยายสัญญาณ และจุดทางด้านเอาต์พุตของภาควิเคราะห์สัญญาณ

#### 2.3.4 วงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม(The Common-Base Amplifier)

ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม [11] ดังแสดงในรูปที่ 23 ถ้ามองในแง่ของไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว วงจรนี้จะไม่แตกต่างไปจากวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วมซึ่งมีความต้านทานเพิ่มเข้าทางด้านอิมิตเตอร์หนึ่งตัว แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีสัญญาณในรูปของความถี่เข้ามา ตัวเก็บประจุ  $C$  จะทำหน้าที่เสมือนลัดวงจรระหว่างเบสกับจุดอ้างอิง (reference terminal) สาเหตุที่ต้องมีความต้านทาน  $R_E$  เพราะถ้าไม่มีความต้านทานนี้ ขาของอิมิตเตอร์จะถูกต่อลัดวงจรลงสู่จุดอ้างอิงจะไม่มีหนทางที่จะให้สัญญาณความต่างศักย์อินพุตเข้าไปทางด้านอิมิตเตอร์ เนื่องจากรอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสได้รับการไบแอสตรง จึงทำให้ความต้านทานทางด้านอินพุตของวงจรชนิดนี้มีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้าม ความต้านทานทางด้านเอาต์พุตของวงจรชนิดนี้จะมีค่าสูงเพราะรอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบสได้รับการไบแอสแบบกลับด้าน จากคุณสมบัติดังกล่าวถ้าเราจัดให้ค่าความต้านทานทั้งทางด้านอินพุต และทางด้านเอาต์พุตมีค่าที่เหมาะสมแล้ว เราสามารถใช้วงจรชนิดนี้ เชื่อมโยงวงจรสองภาคที่มีความต้านทานต่างกันเข้าหากันได้ โดยวงจรภาคแรกเป็นวงจรชนิดความต้านทานทางด้านเอาต์พุตต่ำ เช่น ความต้านทานเอาต์พุตของวงจรรอบแอมป์ ส่วนวงจรภาคหลังเป็นวงจรที่มีความ



รูปที่ 23. (ก) วงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม  
(ข) วงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานทางด้านอินพุตสูง วงจรนี้จะนำไปใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างภาคเตรียมการขยายสัญญาณเข้ากับภาคขยายสัญญาณ (amplifier)

ในวงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วมจะมีอัตราขยายสัญญาณกระแส เท่ากับ  $h_{fe}/(1 + h_{fe})$  เนื่องจาก  $h_{fe}$  มีค่ามากดังนั้นอัตราขยายสัญญาณกระแสจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1 จากรูปที่ 23(ข) พิจารณาหาความต้านทานอินพุตของวงจรโดยไม่รวมความต้านทาน  $R_E$  จะได้

$$r_{in} = \frac{h_{ie}}{(1 + h_{fe})} // \frac{1/h_{oe}}{(1 - A_V)} \quad (29)$$

เมื่อ  $A_V$  คือ อัตราขยายสัญญาณความต่างศักย์  $v_o/v_i$  และความต้านทานทางด้านเอาต์พุตจะเป็น

$$R_o \approx R_L \quad (30)$$

ในทางปฏิบัติ  $1/h_{oe}$  มีค่าสูงมากประมาณ  $10^5$  โอห์ม และค่า  $[1/h_{oe}]/(1 - A_V)$  มีค่ามากเมื่อเทียบกับ  $h_{ie}/(1 + h_{fe})$  ดังนั้น จากสมการ (29) จะได้

$$r_{in} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \quad (31)$$

เนื่องจากวงจรนี้มีอัตราขยายกระแสเป็น 1 ดังนั้น จะได้อัตราขยายความต่างศักย์  $A_V$  ดังนี้

$$A_V \approx \frac{R_L(1 + h_{fe})}{h_{ie}} \quad (32)$$

เมื่อพิจารณาความต้านทานทางด้านอินพุตรวมค่า  $R_E$  ด้วยจะได้

$$R_{in} = R_E // r_{in} \quad (33)$$

นั่นคือ จะได้

$$R_{in} \approx \frac{R_E h_{ie}}{h_{ie} + R_E(1 + h_{fe})} \quad (34)$$

ค่าอัตราการขยายกระแสของสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal current gain)  $h_{fe}$  ของทรานซิสเตอร์ เบอร์ต่าง ๆ หาได้จากคู่มือการใช้งานทรานซิสเตอร์ซึ่งบริษัทผู้ผลิต จะกำหนดมาให้ ส่วนค่า  $h_{ie}$  จะหาได้ดังนี้ [12]

$$h_{ie} = \frac{(1 + h_{fe})kT/q}{I_E} \quad (35)$$

โดย  $k$  เป็นค่าคงที่ของ Boltzmann  
 $q$  เป็นค่าประจุพื้นฐานบนอิเล็กตรอน  
 $T$  เป็นอุณหภูมิ  
 $I_E$  เป็นกระแสไฟตรงที่ไหลผ่านอิมิตเตอร์

$$I_E = (1 + h_{FE})I_B \quad (36)$$

เมื่อ  $I_B$  คือกระแสไฟตรงที่ไหลผ่านเบสและ  $h_{FE}$  คืออัตราการขยายกระแสไฟตรง ของทรานซิสเตอร์ ค่าของ  $h_{FE}$  หาได้จากคู่มือการใช้งานทรานซิสเตอร์เช่นเดียวกับ  $h_{fe}$  ที่อุณหภูมิห้อง ค่า  $kT/q$  จะมีค่าประมาณ 0.026 โวลต์ ดังนั้น สมการที่ (35) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$h_{ie} = \frac{0.026(1 + h_{fe})}{(1 + h_{FE})I_B} \quad (37)$$

จากสมการที่ (37) แทนค่า  $h_{ie}$  ลงใน สมการที่ (32) และสมการที่ (34) จะได้

$$A_v = \frac{(1 + h_{FE})R_L I_B}{0.026} \quad (38)$$

$$R_{in} = \frac{0.026R_E}{0.026 + (1 + h_{FE})R_E I_B} \quad (39)$$

จากสมการที่ (30) สมการที่ (38) และ สมการที่ (39) ทำให้เราสามารถหาค่าความต้านทานทางด้านเอาต์พุต อัตราการขยายความต่างศักย์ และความต้านทานทางด้านอินพุตของวงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วมในรูปที่ 23(ก) ได้ จากสมการที่ (39) ถ้าเราทราบค่า  $R_{in}$  และ  $R_E$  เราสามารถหาค่า  $I_B$  ได้ และสามารถหาค่า  $I_B$  ไปหาค่า  $R_B$  ของวงจรในรูปที่ 23(ก) ได้ สัญญาณที่ออกทางด้านเอาต์พุตของวงจรนี้จะมีเฟสเดียวกันกับสัญญาณที่เข้าทางด้านอินพุต ไม่มีอัตราการขยายสัญญาณทางด้านกระแส แต่มีอัตราการขยายสัญญาณทางด้านความต่างศักย์ วงจรนี้จะถูกนำมาใช้งานอยู่ 2 จุด จุดแรกเป็นจุดเชื่อมโยงเข้าทางด้านอินพุตของภาคขยายสัญญาณจุดที่ 2 เป็นจุดเชื่อมโยงออกจากด้านเอาต์พุตของภาคขยายสัญญาณเพื่อผ่านสัญญาณไปยังภาคอื่นที่อยู่ถัดไป

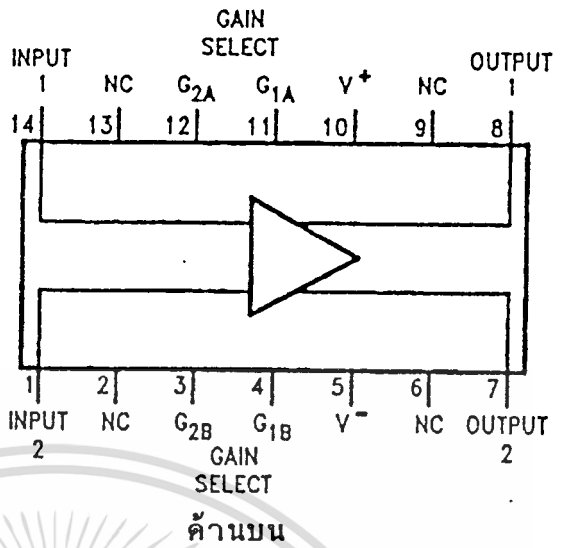
### 2.3.5 ภาคขยายสัญญาณ (Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณที่ใช้เป็นวงจรชนิดขยายสัญญาณความแตกต่าง (Differential Amplifier) [11] วงจรชนิดนี้ประกอบไปด้วยสองอินพุต และมีเอาต์พุตหนึ่งแห่งหรือมากกว่า สัญญาณทางด้านเอาต์พุตโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปของสัญญาณความต่างศักย์ ซึ่งมีขนาดเป็นผลคูณจำนวนเท่าของผลต่างระหว่างความต่างศักย์ที่อินพุตทั้งสอง ถ้าให้  $v_A$  และ  $v_B$  เป็นขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จะหาความต่างศักย์ทางด้านเอาต์พุต  $v_O$  ได้ดังนี้

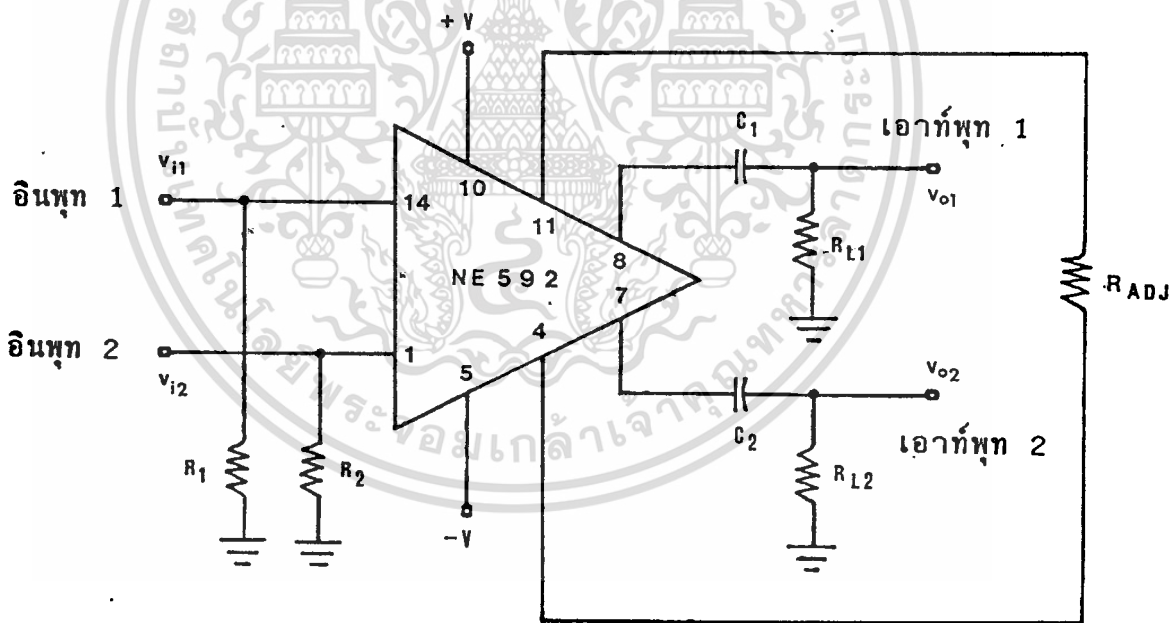
$$v_O = A_V(v_A - v_B) \quad (40)$$

เมื่อ  $A_V$  คือ อัตราการขยายความต่างศักย์ของวงจร

วงจรขยายสัญญาณความแตกต่างที่ผลิตสำเร็จอยู่ในรูปไอซีมีอยู่มากมายหลายแบบ มีองค์ประกอบและคุณสมบัติแตกต่างกัน แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เบอร์ LM 592 Differential Video Amp [ผนวก ข] ตำแหน่งต่าง ๆ ของขาไอซีดังแสดงในรูปที่ 24 ไอซีเบอร์นี้มีอินพุต 2 แห่ง คือที่ขา 1 และขา 14 มีเอาต์พุต 2 แห่ง คือ ที่ขา 7 และที่ขา 8 มีความต้านทานทางด้านเอาต์พุตต่ำ มีความกว้างของแถบขยายสัญญาณ (bandwidth) สูงถึง 120 MHz เหมาะสมสำหรับใช้ขยายสัญญาณที่เป็นพัลส์ อัตราการขยายสัญญาณผลต่างของความต่างศักย์ทางด้านเอาต์พุตมีค่าคงที่ 2 ค่าคือ 400 (GAIN 1) และ 100 (GAIN 2) โดยไม่ต้องเพิ่มองค์ประกอบภายนอกแต่อย่างใด กล่าวคือ ถ้าต่อขาที่ 11 ( $G_{1A}$ ) เข้ากับขาที่ 4 ( $G_{1B}$ ) จะให้อัตราการขยายเป็น 400 แต่ถ้าต่อขาที่ 12 ( $G_{2A}$ ) เข้ากับขาที่ 3 ( $G_{2B}$ ) จะให้อัตราการขยายเป็น 100

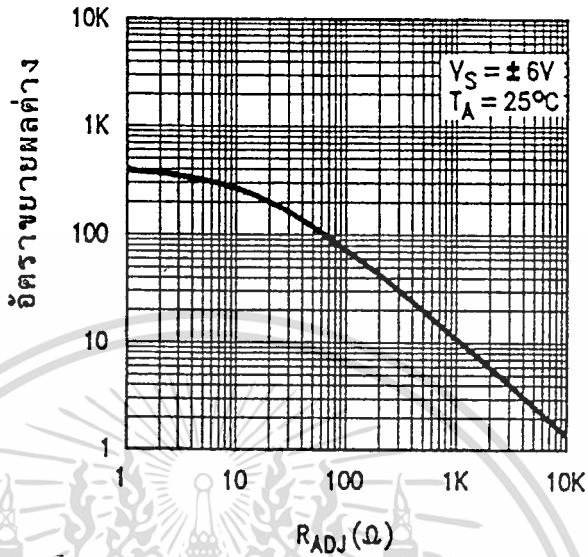


รูปที่ 24. ฟังแสดงตำแหน่งขาของไอซี เบอร์ LM592 เมื่อมองทางด้านบน



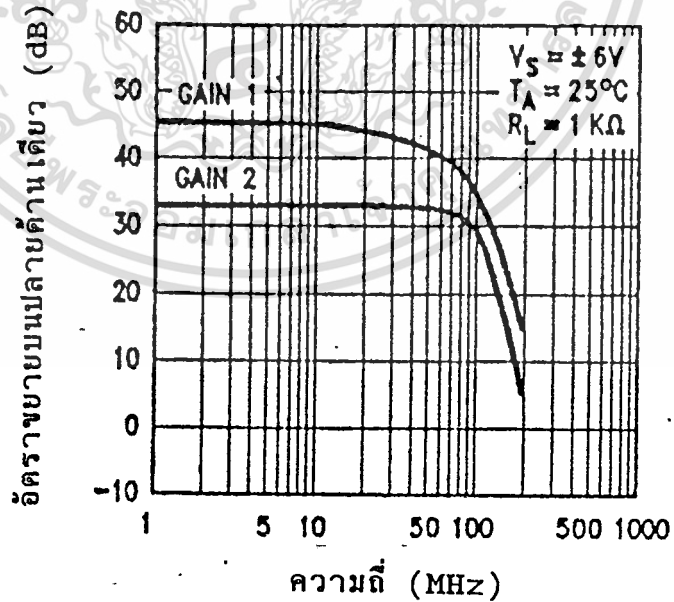
รูปที่ 25. ลักษณะการต่อวงจรใช้งานของไอซีวงจรรขยายสัญญาณเบอร์ LM592 แบบปรับอัตราขยายได้

อัตรการขยายที่ค่า  $R_{ADJ}$  ต่าง ๆ



รูปที่ 26. อัตรการขยายสัญญาณความต่างคักย์แบบผลต่างของสัญญาณทางด้านเอาต์พุทเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่ใช้ในการปรับค่าอัตรการขยาย

อัตรการขยายที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 27. อัตรการขยายสัญญาณความต่างคักย์ที่ปลายเอาต์พุทเดี่ยวที่ความถี่ต่าง ๆ สำหรับการขยายแบบอัตรการขยายคงที่ (GAIN 1 และ GAIN 2)

และนอกจากนี้เรายังสามารถทำให้อัตราการขยายนี้ปรับค่าได้ โดยใช้ค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้เพียงตัวเดียวต่อระหว่าง ขาที่ 11 และขาที่ 4 ซึ่งจะทำให้สามารถปรับค่าอัตราการขยายได้ตั้งแต่ 0 ถึง 400 วงจรในรูปที่ 25 เป็นแบบปรับอัตราการขยายได้ ถ้าให้ที่อินพุทที่ 1 มีสัญญาณความต่างศักย์เป็น  $v_{i1}$  ที่อินพุทที่ 2 มีสัญญาณความต่างศักย์เป็น  $v_{i2}$  สัญญาณความต่างศักย์ที่ออกจากเอาต์พุทที่ 1 เป็น  $v_{o1}$  และสัญญาณความต่างศักย์ที่ออกจากเอาต์พุทที่ 2 เป็น  $v_{o2}$  จะได้

$$v_{o2} - v_{o1} = A_{vd}(v_{i2} - v_{i1}) \quad (41)$$

เมื่อ  $A_{vd}$  คืออัตราการขยายความต่างศักย์แบบผลต่าง (Differential Voltage Gain) ของวงจร ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $A_{vd}$  กับค่าความต้านทาน  $R_{ADJ}$  ที่ต่อระหว่าง ขาที่ 4 และขาที่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 26

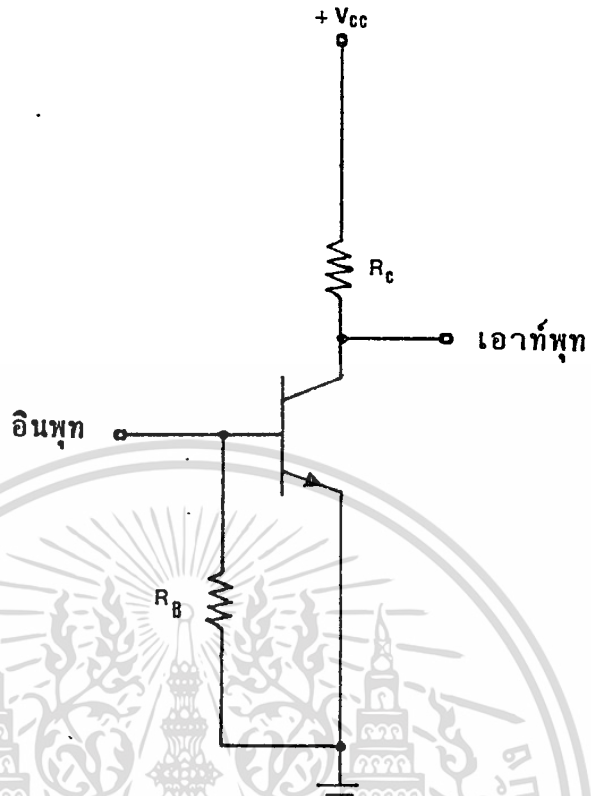
สำหรับวงจรที่จะนำไปใช้งานในภาคปฏิบัติต่อไป จะใช้งานเพียงอินพุทเดียว และเอาต์พุทเดียว ทั้งอินพุทและเอาต์พุทมีเฟสเหมือนกัน และใช้วงจรเช่นเดียวกับรูปที่ 25 แต่ต่อตัวเก็บประจุ 1 ตัว คร่อมระหว่างอินพุทที่ 1 และกราวด์ (ground) ทำให้ระดับสัญญาณกระแสสลับ (AC) ที่จุดนี้เป็นศูนย์เมื่อเทียบกับกราวด์ และจะต่อสัญญาณขาเข้าที่อินพุทที่ 2 และนอกจากนั้นจะตัดองค์ประกอบภายนอกอื่น ๆ ที่ต่อกับขาที่ 8 ออกให้สัญญาณทางด้านเอาต์พุทออกด้านเอาต์พุทที่ 2 เพียงแห่งเดียว ในกรณีนี้จะได้

$$v_{o2} = A_v v_{i2} \quad (42)$$

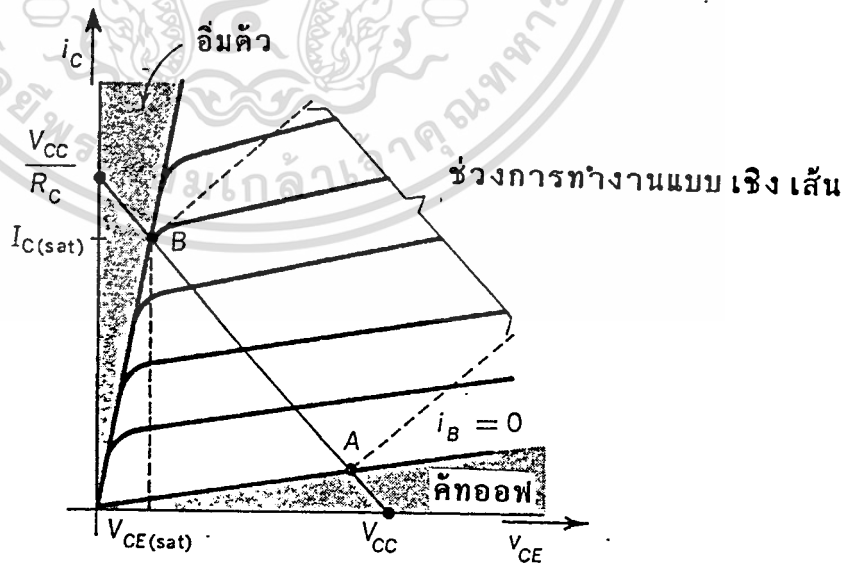
เมื่อ  $A_v$  คืออัตราการขยายของวงจร อัตราการขยายที่ปลายเอาต์พุทปลายเดียว ที่ความถี่ต่าง ๆ เมื่อต่อวงจรแบบอัตราขยายคงที่ (GAIN 1 และ GAIN 2) ดังแสดงในรูปที่ 27 เมื่อสัญญาณผ่านออกจากด้านเอาต์พุทของภาคนี้ไปแล้วสัญญาณนี้จะถูกรองโดยวงจรรองความถี่แบบผ่านแถบ (ได้กล่าวผ่านมาแล้วในข้อ 2.3.3) และเชื่อมโยงต่อไปยังวงจรขลิบสัญญาณเพื่อขลิบสัญญาณรบกวนที่ยังเหลืออยู่ออกไป แล้วนำสัญญาณนี้ไปใช้งานในภาคต่อไป

### 2.3.6 วงจรขลิบสัญญาณ (Clipper)

วงจรขลิบสัญญาณที่ใช้เป็นแบบขลิบสัญญาณและกลับเฟส โดยใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียวต่อแบบอิมิตเตอร์ร่วม ที่เบสของทรานซิสเตอร์จะถูกไบแอสให้อยู่ที่ระดับศูนย์ (zero bias) โดยการต่อความต้านทานคร่อมระหว่างเบส และ



รูปที่ 28. วงจรขั้วเสียบสัญญาณแบบกลับเฟส



รูปที่ 29. ขีดจำกัดของการอิมคิวและการคัทออฟของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

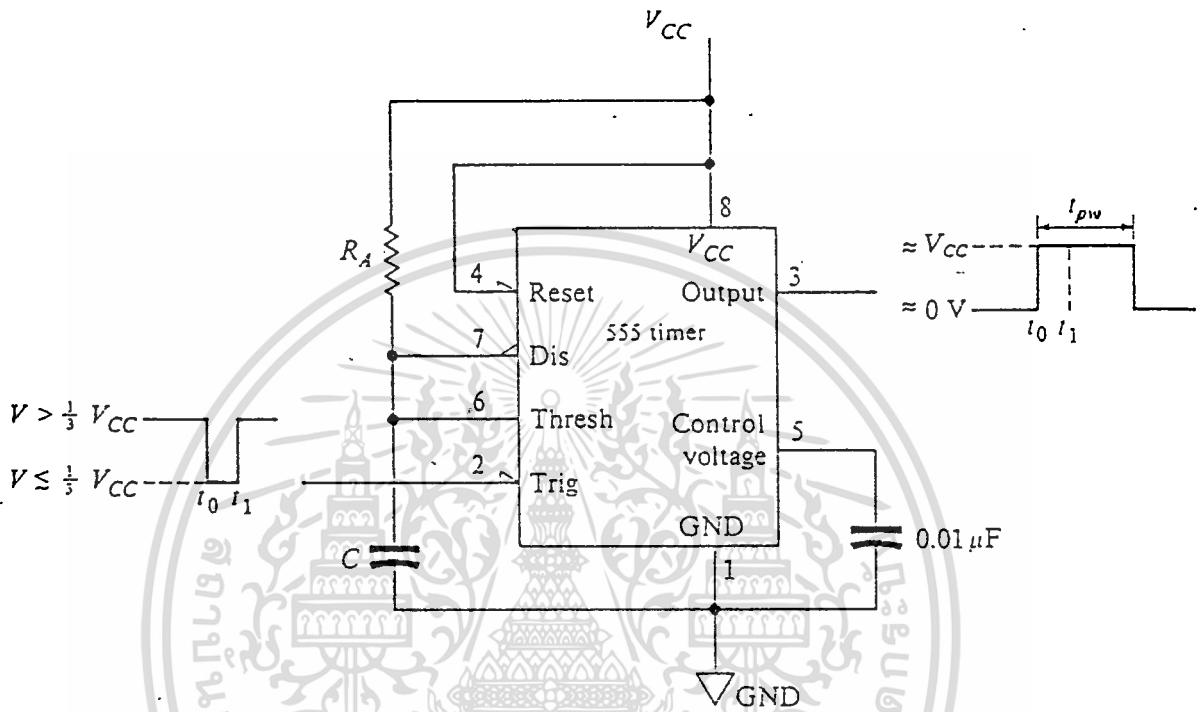
กราฟดังแสดงในรูปที่ 28 เมื่อไม่มีสัญญาณเข้าทางด้านอินพุททรานซิสเตอร์ตัวนี้จะอยู่ในสภาวะคัทออฟ (cutoff) รูปที่ 29 แสดงจุดคัทออฟ A และจุดอิ่มตัว (saturation) B ของทรานซิสเตอร์ เมื่อให้สัญญาณเข้าไปทางด้านอินพุทของวงจรในลักษณะการไบแอสตรง และสัญญาณนั้นมีขนาดสูงกว่าหรือเท่ากับค่าความต่างศักย์เริ่มทำงาน (working voltage) ของเบส-อิมิตเตอร์ คอลเลคเตอร์จะนำกระแส ถ้าเพิ่มกระแสที่ไหลเข้าไปในเบสขึ้นอีก จุดทำงานของทรานซิสเตอร์จะเลื่อนออกจากจุด A ตามเส้นโหลดเข้าหาจุด B และคอลเลคเตอร์จะนำกระแสเพิ่มขึ้น ถ้าหากจุดทำงานของทรานซิสเตอร์นี้อยู่ที่จุด B การเพิ่มปริมาณของกระแสที่ไหลเข้าไปในเบสจะไม่ทำให้ปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านคอลเลคเตอร์  $I_C$  นั้นเปลี่ยนแปลงไป สภาวะเช่นนี้เรียกว่าเกิดการอิ่มตัว และความต่างศักย์ระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์  $V_{CE}$  จะอิ่มตัวด้วย ค่าความต่างศักย์เริ่มทำงานของ เบส-อิมิตเตอร์ สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิกอน จะมีค่าประมาณ 0.6 โวลต์ ดังนั้น สัญญาณที่ผ่านเข้าทางอินพุทที่มีขนาดต่ำกว่า 0.6 โวลต์จะถูกตัดหรือขลิบออก ถ้าปรับอัตราขยายสัญญาณของภาคขยายสัญญาณให้เหมาะสมให้ได้สัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่ำกว่า 0.6 โวลต์ แล้วสัญญาณรบกวนนี้จะถูกขลิบออกเมื่อผ่านวงจรขลิบสัญญาณนี้ และสัญญาณทางด้านอินพุทส่วนที่เกินหรือเท่ากับ 0.6 โวลต์ จะถูกขยายแบบกลับเฟสผ่านออกทางคอลเลคเตอร์เพื่อนำไปขยายความกว้างของพัลส์ในภาคถัดไป

### 2.3.7 วงจรขยายความกว้างของพัลส์

วงจรขยายความกว้างของพัลส์ที่นำมาใช้งานเป็นวงจรแบบโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (monostable multivibrator) [12] โดยใช้อิซีเบอร์ 555 ลักษณะของวงจรดังแสดงในรูปที่ 30 ความกว้างของพัลส์ที่ถูกขยายจะถูกกำหนดด้วยค่าความต้านทาน  $R_A$  และตัวเก็บประจุ C ดังนี้

$$t_{pw} = 1.1 R_A C \quad (43)$$

เมื่อ  $t_{pw}$  คือช่วงความกว้างของพัลส์มีหน่วยเป็นวินาที การทำงานของวงจรนี้ในสภาวะปกติทรานซิสเตอร์ตัวที่ทำหน้าที่ปล่อยประจุ (discharged transistor) ซึ่งอยู่ภายในไอซีจะอยู่ในสถานะเปิดให้กระแสไหลผ่าน (on) ทำให้ศักย์ที่ขา 7 (discharge) อยู่ในสถานะต่ำ (low) ตัวเก็บประจุ C ที่ต่ออยู่ภายนอกจะปลดปล่อยประจุผ่านทรานซิสเตอร์ตัวนี้ และทำให้ศักย์ทางคานเอาท์พุทที่ขา 3 อยู่ในสถานะต่ำ สภาวะนี้จะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ คราบไคที่ศักย์บนขาทริกเกอร์ (trigger) ที่ขา 2 ยังคงรักษา



รูปที่ 30. วงจรขยายความกว้างของพัลส์

ระดับสูงกว่า  $V_{CC}/3$  เมื่อศักย์บนขาทรานซิสเตอร์ลดลงมาสู่ระดับ  $V_{CC}/3$  หรือต่ำกว่า ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ปล่อยประจุจะอยู่ในสถานะปิดไม่ยอมให้กระแสไหลผ่าน (turn off) ศักย์ที่ขาเอาต์พุตจะมีค่าสูง (high) และจะยังคงมีค่าสูงต่อไป ในขณะที่ตัวเก็บประจุ C จะถูกประจุผ่านความต้านทาน  $R_A$  ไปสู่ค่า  $V_{CC}$  เมื่อค่าความต่างศักย์คร่อม C มีค่าสูงถึง  $2V_{CC}/3$  จะทำให้ที่ขา 6 (threshold) เกิดการทำงาน และทำให้ ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ปล่อยประจุเปลี่ยนสถานะ ไปเป็นสถานะ เปิดให้ตัวเก็บประจุ C ปล่อยประจุผ่านไปได้ แล้วจึงให้ศักย์ทางด้านเอาต์พุตลงสู่สถานะต่ำ สถานะนี้จะคงอยู่ต่อไปจนกว่าศักย์บนขาทรานซิสเตอร์จะมีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า  $V_{CC}/3$  สัญญาณพัลส์ที่ต้องการ ขยายความกว้างจะมีลักษณะเป็นพัลส์แบบลบ (negative pulse) บ้อนเข้าที่ขาทรานซิสเตอร์ และจะได้พัลส์แบบบวกที่ได้รับการขยายความกว้างแล้วออกมาทางเอาต์พุต ดังแสดงใน รูปที่ 30 จะเห็นว่าพัลส์แบบลบที่มีความกว้างของพัลส์จาก  $t_0$  ถึง  $t_1$  ได้รับการขยาย ความกว้างของพัลส์เป็น  $t_{pw}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.1 R_A C$  ในภาคปฏิบัติสัญญาณพัลส์ ที่จะทำให้การขยายความกว้างจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับในรูปที่ 12 (ก) แต่มีเฟสกลับกัน ส่วนลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่ได้รับการขยายความกว้างแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 12 (ข) สัญญาณนี้จะถูกส่งเข้าไปในภาคกรองความถี่ต่ำผ่านในภาคถัดไป

### 2.3.8 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่นำมาใช้งานเป็นวงจรแบบ RC ดังแสดง ในรูปที่ 31 วงจรนี้จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำผ่านไปได้ แต่จะบั่นทอนขนาดของ สัญญาณที่มีความถี่สูง ทั้งนี้เพราะค่าความต้านทาน (reactance) ของตัวเก็บประจุ C จะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณมีความถี่เพิ่มขึ้น ถ้าสัญญาณที่บ้อนเข้าสู่ทางด้านอินพุตมีความถี่ สูงมาก ตัวเก็บประจุจะประพฤติตัวเสมือนลัดวงจร และจะทำให้สัญญาณที่ออกทางด้าน เอาต์พุตมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ถ้าให้สัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ RC นี้เป็นแบบซายน์ (sinusoidal) จะหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณและความถี่ได้ดังนี้

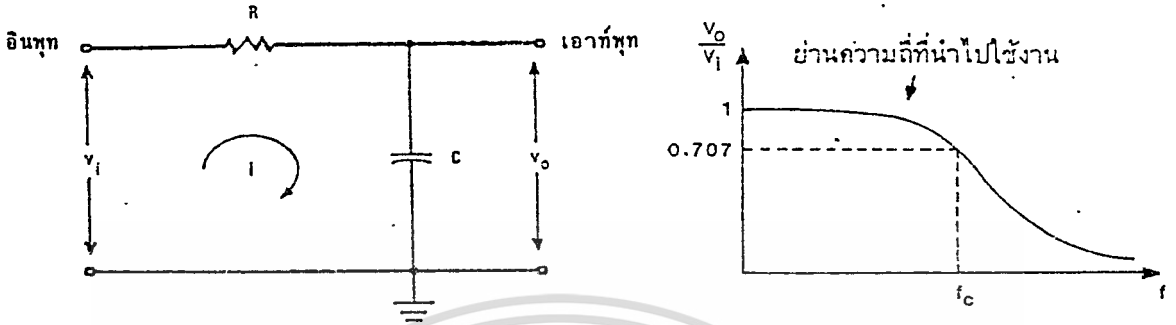
$$\left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \frac{1}{[1 + (f/f_c)^2]^{1/2}} \quad (44)$$

เมื่อ  $v_i$  คือ ขนาดของสัญญาณความถี่  $f$  ที่บ้อนเข้าทางด้านอินพุต

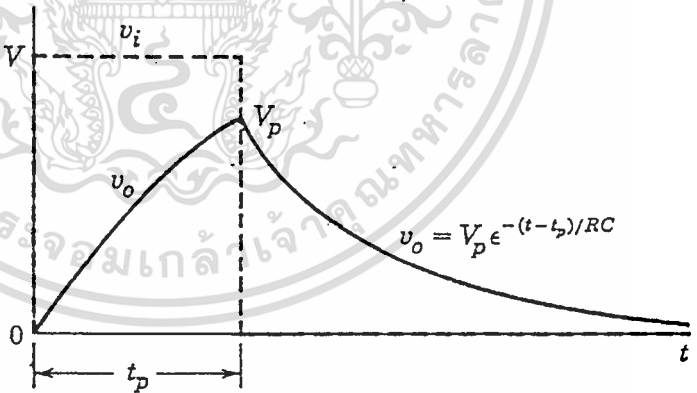
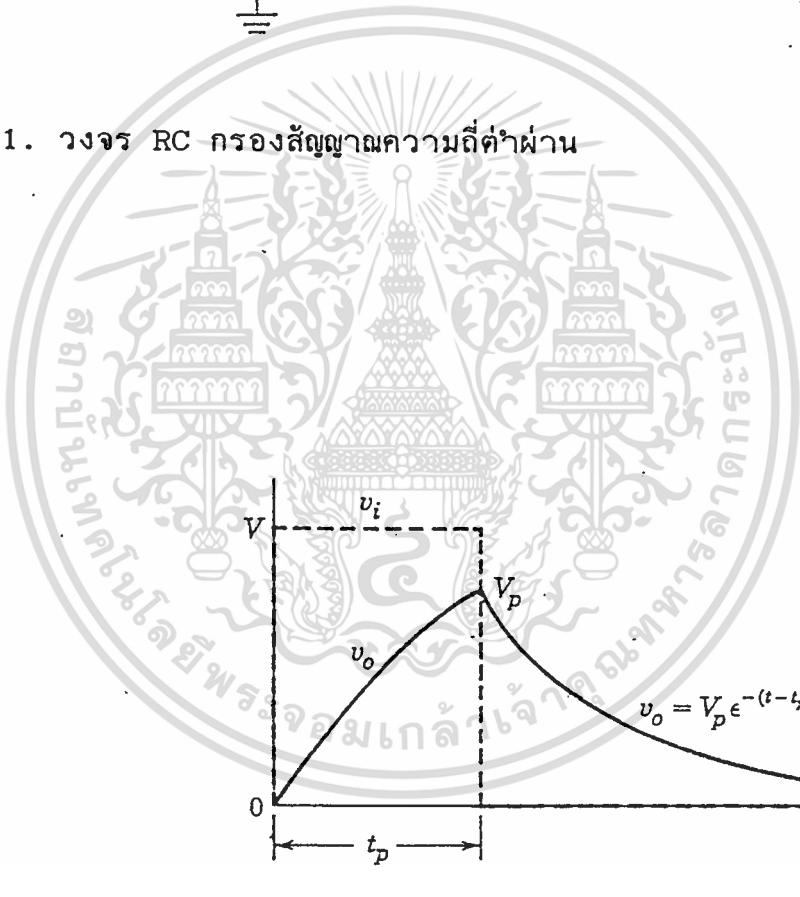
$v_o$  คือ ขนาดของสัญญาณความถี่  $f$  ที่ออกมาทางเอาต์พุต

$f_c$  คือ ค่าความถี่คัทออฟ หรือความถี่ที่สัญญาณเอาต์พุตมี

ขนาดลดลง 3 เดซิเบล เมื่อเทียบกับขนาดของสัญญาณ



รูปที่ 31. วงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 32. การตอบสนองของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน แบบ RC ต่อสัญญาณที่เป็นแบบพัลส์

## ทางค้ำานอินพุท

$$\text{และ } f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (45)$$

การตอบสนองต่อสัญญาณแบบพัลส์ของวงจรมนี้ จะเป็นลักษณะแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) ดังแสดงในรูปที่ 32 ถ้าให้  $t_p$  คือ ช่วงเวลาของความกว้างของพัลส์ ในช่วงเวลาที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $t_p$  ขนาดของสัญญาณทางค้ำาน เอาท์พุท  $v_o$  ที่เวลา  $t$  ใด ๆ จะเป็นดังนี้

$$v_o = V(1 - e^{-t/RC}) \quad (46)$$

ที่เวลา  $t$  เท่ากับ  $t_p$  จะได้  $v_o$  เท่ากับ  $V_p$  ส่วนในช่วงเวลาที่เลยจาก  $t_p$  ไปแล้วจะได้ขนาดของสัญญาณทางค้ำานเอาท์พุท  $v_o$  ที่เวลา  $t$  ใด ๆ ดังนี้

$$v_o = V_p e^{-(t - t_p)/RC} \quad (47)$$

ในภาคปฏิบัติสัญญาณทางค้ำานอินพุทจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 12(ข) และจะได้สัญญาณทางค้ำานเอาท์พุทดังแสดงในรูปที่ 12(ค) สัญญาณที่ได้นี้จะถูกส่งเข้าไปถอดรหัสในภาคถัดไป

## 2.3.9 ภาคถอดรหัสสัญญาณ

เมื่อตัวรับสัญญาณแสงในระบบติดตามเป้าหมายสามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมายได้ สัญญาณนี้จะผ่านกรรมวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ในตอนสุดท้ายนั้นจะได้ลักษณะของสัญญาณออกจากภาคกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นแบบสัญญาณครบบรอบ (periodic signal) ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณที่มีความถี่แน่นอนค่าหนึ่ง เมื่อใดก็ตามที่สัญญาณแสงเลเซอร์ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5 ถูกยิงออกจากอุปกรณ์ซึ่งเป้าหมายด้วยเลเซอร์ไปกระทบเป้าหมายแล้วสะท้อนไปยังระบบติดตามเป้าหมาย ทำให้ตัวรับสัญญาณแสงรับสัญญาณที่สะท้อนจากเป้าหมายนั้นได้ สัญญาณที่ออกจากภาคกรองความถี่ต่ำผ่านจะเป็นสัญญาณที่มีความถี่แน่นอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วเสมอ ดังนั้น ถ้าสัญญาณที่ออกมาจากภาคกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นสัญญาณลักษณะอื่นหรือมีความถี่อื่น แสดงว่าสัญญาณนั้นไม่ได้เกิดจากการซึ่งเป้าโดยอุปกรณ์ซึ่งเป้าหมายของฝ่ายเรา นั่นคือ ทำให้เราทราบว่สัญญาณที่ได้นั้นเกิดจากการซึ่งเป้าของฝ่ายเราหรือไม่ วงจรถอดรหัสที่ใช้ถัดไปจาก

วงจรรองความถี่ต่ำผ่านจึงใช้แบบถอดรหัสช่วงความถี่ (Tone Decoder) [13], [14] ในวงจรถอดรหัสชนิดนี้จะมีวงจรรอสซิลเลเตอร์ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (Voltage Control Oscillator) VCO วงจรนี้จะสร้างความถี่ขึ้นมาค่าหนึ่ง ถ้าสัญญาณที่เข้ามาทางด้านอินพุตของวงจรถอดรหัส มีความถี่ตรงกับความถี่ที่ VCO สร้างขึ้นจะมีผลทำให้เอาท์พุทของวงจรมีระดับต่ำ (low) แต่ถ้าสัญญาณทางด้านอินพุตมีความถี่ต่างไปจากความถี่ของ VCO เอาท์พุทของวงจรมีระดับสูง (high) ในภาคปฏิบัติใช้ ไอซีเบอร์ LM 567 Tone Decoder สามารถปรับตั้งความถี่ได้ตั้งแต่ 0.01 Hz จนถึง 500 kHz มีแถบความกว้างในการตรวจจับความถี่ (bandwidth) ที่สามารถปรับได้จาก 0 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ของความถี่ที่ตั้งค่าไว้ (center frequency) ค่าความถี่ของ VCO แถบความกว้างในการตรวจจับความถี่และการประวิงสัญญาณทางด้านเอาท์พุท (output delay) มีความเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน สามารถตั้งค่าได้โดยใช้องค์ประกอบภายนอกเข้าต่อร่วมกับไอซีตัวนี้ ลักษณะของวงจรถอดรหัสความถี่ของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 33

ถ้าให้  $f_0$  คือค่าความถี่ของ VCO (center frequency) มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) จะได้ [ผนวก ค]

$$f_0 = \frac{1}{1.1R_1C_1} \quad (48)$$

เพื่อให้เกิดเสถียรภาพสูงสุดต่ออุณหภูมิ ค่า  $R_1$  ที่ใช้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2 กิโลโอห์ม กับ 20 กิโลโอห์ม

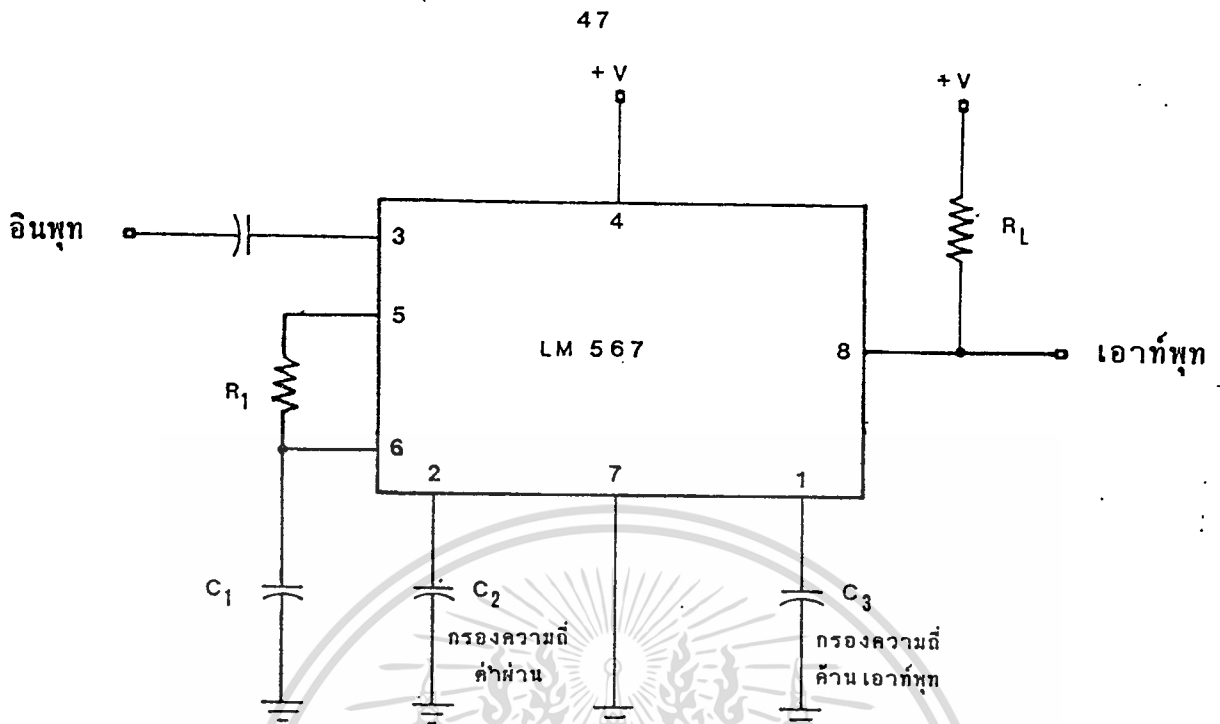
ถ้าให้  $v_i$  คือ ค่าความต่างศักย์ทางด้านอินพุท ( $V_{rms}$ )

BW คือ ความกว้างแถบในการตรวจจับความถี่ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ  $f_0$

และ  $v_i \leq 200 \text{ mV}_{rms}$  จะหาค่า BW โดยประมาณได้ดังนี้

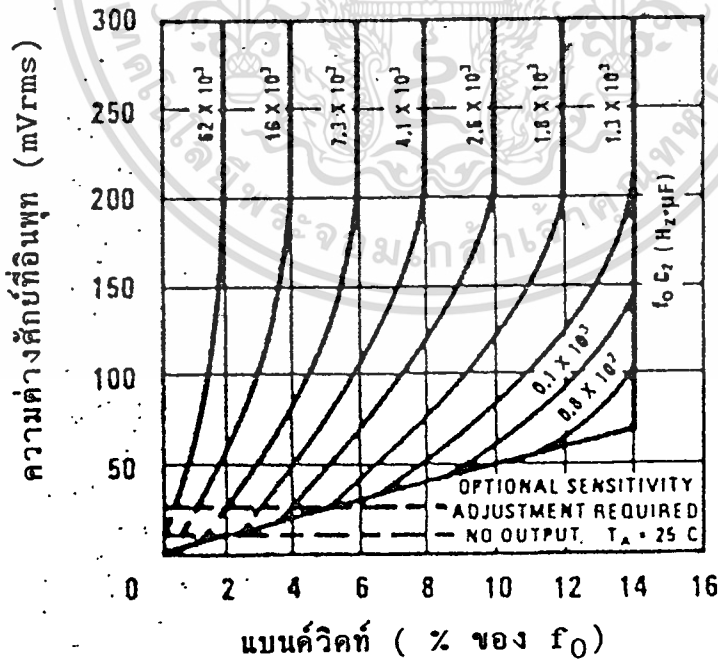
$$BW = 1070 \sqrt{\frac{v_i}{f_0 C_2}} \quad (49)$$

$C_2$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่กรองความถี่ต่ำผ่านซึ่งต่อเข้าทางด้านขา 2 ของไอซี มีหน่วยเป็นไมโครฟารัด ( $\mu F$ )



รูปที่ 33. วงจรถอครห์สความถี่ของสัญญาณ

แบบค้วคท์ที่ขนาดสัญญาณอินพุตต่าง ๆ



รูปที่ 34. ความสัมพันธ์ระหว่างแถบความกว้างของการตรวจจับความถี่กับขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุตสำหรับ  $f_0 C_2$  ค่าต่าง ๆ

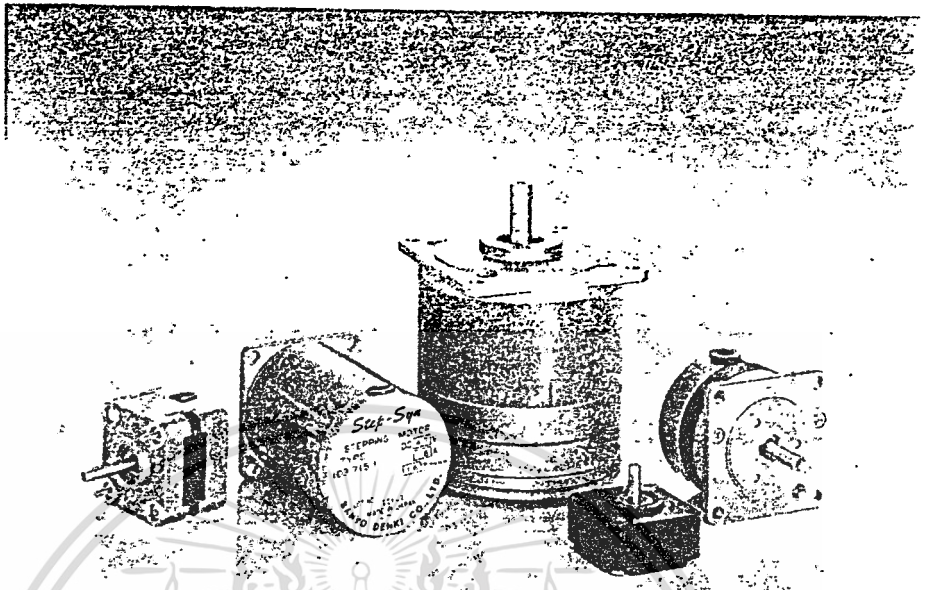
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วค่า BW ยังสามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $v_i$  และ BW ที่ค่า  $f_0C_2$  ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 34 สำหรับค่าของ  $C_3$  จะมีผลต่อลักษณะของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต ถ้า  $C_3$  มีค่าต่ำ จะทำให้ทางด้านเอาต์พุตเปิด-ปิด ในขณะที่มีความถี่นอกแถบที่ต้องการตรวจจับผ่านเข้ามาทางด้านอินพุต และถ้าค่า  $C_3$  มีค่าสูงมาก ระยะเวลาของการเปิดและปิดทางด้านเอาต์พุตจะถูกประวิงไว้ จนกว่าค่าความต่างศักย์บน  $C_3$  จะผ่านเลยจุดความต่างศักย์ขีดเริ่ม (threshold voltage) ไปแล้ว โดยธรรมชาติค่าต่ำสุดของ  $C_3$  จะเท่ากับ  $2C_2$

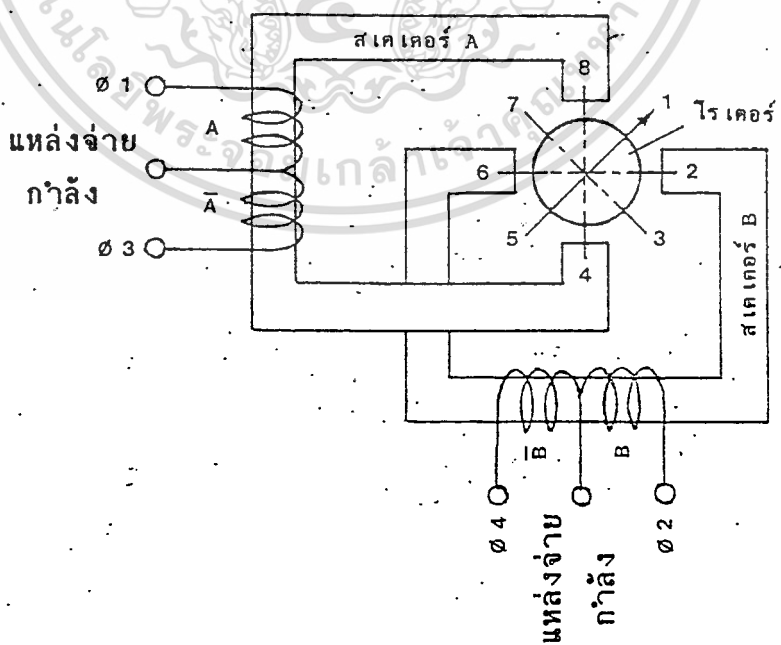
การทำงานของวงจรในรูปที่ 33 สัญญาณในรูปของความถี่จะถูกส่งเข้าไปทางด้านขา 3 สัญญาณที่ผ่านการถอดรหัสแล้วจะถูกส่งออกทางขา 8 ในรูปของสถานะสูง หรือต่ำ ถ้าสัญญาณที่เข้าไปทางด้านขา 3 มีความถี่ตรงกับความถี่ของ VCO หรืออยู่ในย่านของ BW แล้ว สถานะทางด้านเอาต์พุตจะอยู่ในสถานะต่ำ แต่ถ้าสัญญาณที่เข้ามาทางด้านอินพุตไม่ตรงกับความถี่ของ VCO หรืออยู่นอกย่านของ BW แล้ว สถานะทางด้านเอาต์พุตจะอยู่ในสถานะสูง จากสถานะเหล่านี้ทำให้เราทราบว่าตัวรับสัญญาณแสงในระบบติดตามเป้าหมายสามารถรับสัญญาณสะท้อนจากการชี้เป้าได้หรือไม่ ถ้าสามารถรับสัญญาณได้จะทำให้เอาต์พุตของวงจรถอดรหัสที่อยู่ในชุดเดียวกันกับตัวรับสัญญาณแสงนั้นอยู่ในสถานะต่ำ แต่ถ้ารับไม่ได้หรือไม่ใช่สัญญาณจากการชี้เป้าของฝ่ายเรา เอาต์พุตดังกล่าวจะอยู่ในสถานะสูง ในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบ จะประกอบด้วยตัวรับสัญญาณแสง 4 ตัว และจะประกอบด้วยวงจรภาคต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วรวมทั้งวงจรภาคถอดรหัสด้วย 4 ชุด แต่ละชุดจะเป็นอิสระ ไม่ขึ้นต่อกัน สัญญาณที่ออกจากภาคถอดรหัสแต่ละชุดจะถูกเชื่อมโยงไปยังภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ เพื่อบังคับให้ระบบติดตามเป้าหมายหันเข้าหาเป้าหมายที่กำลังถูกชี้ด้วยแสงเลเซอร์ การตอบสนองต่อทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อตัวรับสัญญาณแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถรับสัญญาณจากการชี้เป้าได้นั้นได้กล่าวผ่านมาแล้วในหัวข้อ 2.3.1 และตารางที่ 1

#### 2.3.10 ภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่

ภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ทำหน้าที่ควบคุมให้ระบบติดตามเป้าหมายหันหน้าเข้าหาเป้าหมายที่ถูกชี้ตลอดเวลา การตอบสนองของภาคนี้ว่าจะบังคับให้ระบบหันไปทางทิศใดขึ้นกับลักษณะของสัญญาณที่ออกจากเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสทั้ง 4 ชุดดังกล่าวผ่านมาแล้ว ในภาคนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนที่เป็นอุปกรณ์เชิงกลทำหน้าที่บังคับให้ระบบหันเลี้ยวตามทิศทางที่ต้องการ และส่วนที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ควบคุมอุปกรณ์เชิงกลให้ทำงานตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยยึดถือสถานะต่าง ๆ ของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสสัญญาณทั้ง 4 ชุด เป็นตัวกำหนดทิศทางการหันเข้า



รูปที่ 35. สเตปปีงมอเตอร์



รูปที่ 36. โครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของสเตปปีงมอเตอร์ แบบ 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาเป้าหมายของระบบ และจะสอดคล้องกับผลการตอบสนองของ โฟโตไดโอดที่สามารถรับสัญญาณการเข้าได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในตารางที่ 1

อุปกรณ์เชิงกลที่นำไปใช้งานในภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่มีได้หลายแบบ เช่นใช้ระบบไฮดรอลิก (hydraulics) ระบบนิวเมติก (pneumatics) ระบบเซอร์โวมอเตอร์ (servomotors) ระบบการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก (magnetic induction) เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบเหล่านี้มีลักษณะการทำงาน และความละเอียดอ่อนในการออกแบบแตกต่างกันออกไป อุปกรณ์เชิงกลที่จะนำมาใช้ในภาคทดลองของโครงการนี้ คือ สเต็ปป์มอเตอร์ (stepping motor) โดยจะให้เป็นแบบจำลองเพื่อใช้บังคับให้ระบบหันทิศทางการตอบสนองต่อตำแหน่งที่อยู่ของเป้าหมายที่ตรวจจับได้ ในหัวข้อ 2.3.1 และในตารางที่ 1 จะพบว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของระบบจะหันตอบสนองต่อตำแหน่งของเป้าหมายมีทั้งหมด 5 ทิศทาง คือ  $D_1$   $D_2$   $D_3$   $D_4$  และตรงไปทางด้านหน้า โดยทิศ  $D_1$   $D_2$   $D_3$  และ  $D_4$  เป็นทิศที่หันไปทางด้านข้างของระบบมีทิศตั้งฉากกับทิศตรงไปทางด้านหน้า ทิศ  $D_1$  จะอยู่ตรงข้ามกับทิศ  $D_2$  และอยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนทิศ  $D_3$  จะอยู่ตรงข้ามกับทิศ  $D_4$  และอยู่ในแนวเดียวกัน แนวของ  $D_1$   $D_2$  และ  $D_3$   $D_4$  จะตั้งฉากกัน (ดูรูปที่ 16) สเต็ปป์มอเตอร์ 1 ตัว จะบังคับให้ระบบสามารถหันไปได้ใน 2 ทิศทางที่ตรงกันข้าม ดังนั้นในระบบติดตามเป้าหมายนี้จะใช้สเต็ปป์มอเตอร์ 2 ตัว ตัวแรกจะใช้ในการบังคับให้ระบบหันไปในทิศ  $D_1$  หรือ  $D_2$  ส่วนตัวหลังจะใช้บังคับให้ระบบหันไปในทิศ  $D_3$  หรือ  $D_4$  โดยอาศัยทิศทางการหมุนของแกนมอเตอร์ทั้ง 2 เป็นหลัก ในกรณีเป้าหมายอยู่ตรงหน้าของระบบ มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะไม่หมุนจะหยุดนิ่งคงที่จนกว่าเป้าหมายจะเลื่อนไปอยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งของระบบ มอเตอร์จึงจะหมุนให้ระบบหันหน้าเข้าหาเป้าหมายที่ถูกระบุขึ้นเสมอ ลักษณะรูปร่างทั่วไปของสเต็ปป์มอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 35

สเต็ปป์มอเตอร์ [15] เป็นอุปกรณ์จำพวกเชิงกลทางไฟฟ้าที่มีอินพุทเป็นกลุ่มของความต่างศักย์แบบไบนารี (binary voltage) และมีเอาต์พุทเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม หรือหมุนไปเป็นสเต็ป (steps) ขนาดของสเต็ปจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1 องศา ถึง 30 องศา ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ องค์ประกอบที่สำคัญของสเต็ปป์มอเตอร์มีอยู่ 2 ส่วน คือ สเตเตอร์ (stator) เป็นส่วนที่ติดอยู่กับที่บนโครงของสเต็ปป์มอเตอร์ โดยทั่วไปแล้วในสเต็ปป์มอเตอร์ตัวหนึ่งจะมีขดของสเตเตอร์อยู่หลายขด ซึ่งแต่ละขด เรียกว่า เฟส (phase,  $\phi$ ) ซึ่งอาจจะมี 3 เฟส 4 เฟส หรือ 5 เฟส แล้วแต่การออกแบบนำไปใช้งาน องค์ประกอบส่วนที่เหลือเรียกว่า โรเตอร์ (rotor) เป็นส่วนที่อยู่ภายในแกนกลางของมอเตอร์ อาจทำได้ด้วย

เหล็กอ่อน หรือแม่เหล็กถาวรหรือทั้งสองอย่างผสมกัน เมื่อป้อนกระแสไฟตรงให้กับขดลวดสเตเตอร์จะเกิดแรงผลักบนโรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนไปตามค่าของมุมสเตป (step angle) ไปอยู่ในตำแหน่งคงที่ตำแหน่งหนึ่ง ถ้าเราเปลี่ยนให้กระแสไฟตรงไหลผ่านเฟสอื่นจะเกิดแรงผลักให้โรเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่คงที่ตำแหน่งอื่น ๆ ต่อไป โรเตอร์จะติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนแกนของมอเตอร์ก็จะหมุนตาม การจ่ายกระแสให้กับเฟสต่าง ๆ จะจ่ายในลักษณะของพัลส์ของกระแสไฟตรง เฟสใดที่ถูกจ่ายกระแสไฟผ่าน เรียกว่า เฟสที่ถูกกระตุ้น (excited) ถ้าการกระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสเตปมอเตอร์ถูกจัดเรียงเป็นลำดับ (sequence) อย่างเหมาะสม จะทำให้แกนของสเตปมอเตอร์หมุนไปเป็นสเตปอย่างต่อเนื่องในทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่แน่นอน ความถี่ของการสเตปจะขึ้นอยู่กับความถี่ของพัลส์ที่กระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของมอเตอร์นั้น แรงบิด (torque) ของโรเตอร์เมื่อให้กระแสที่จ่ายให้เฟสต่าง ๆ คงที่จะขึ้นกับวิธีการที่จะกระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของมอเตอร์ และขึ้นกับความถี่ของพัลส์ที่กระตุ้นเฟสต่าง ๆ ด้วยการกระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสเตปมอเตอร์แบ่งเป็น กระตุ้นทีละ 1 เฟส กระตุ้นทีละ 2 เฟสพร้อมกัน หรือกระตุ้นแบบทีละ 1 เฟสและทีละ 2 เฟส สลับกันไป การกระตุ้นแบบทีละ 1 เฟสจะให้แรงบิดต่ำสุด การกระตุ้นทีละ 2 เฟสจะให้แรงบิดสูงสุด ทั้งสองแบบนี้จะมีมุมระหว่างสเตปเท่ากัน การกระตุ้นแบบ 1-2 เฟสสลับกันจะให้แรงบิดมีขนาดปานกลางมีค่าอยู่ระหว่างค่าของแรงบิดของสองวิธีแรก แต่มุมของการสเตปจะมีค่าลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของค่ามุมสเตปของสองวิธีแรก

สเตปมอเตอร์ที่ใช้กันทั่วไปมีอยู่ 3 ชนิด คือ

1. แบบวาริเอเบิล รีลัคแตนซ์ (variable reluctance, VR)

สเตปมอเตอร์ชนิดนี้มีโรเตอร์ เป็นแบบฟันเฟือง (gear-shaped) ทำด้วยเหล็กอ่อน

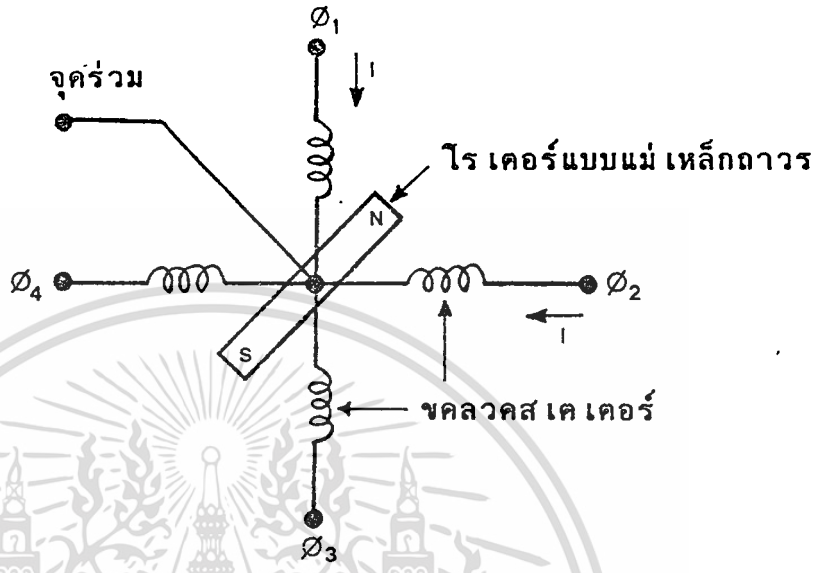
2. แบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet, PM)

สเตปมอเตอร์ชนิดนี้ โรเตอร์ทำจากแม่เหล็กถาวร สามารถทำให้เกิดแรงบิด (holding torque) ได้แม้ว่าจะไม่มีการกระตุ้นที่เฟสต่าง ๆ ของมอเตอร์

3. แบบผสม (hybrid)

เป็นแบบที่เกิดจากการรวมเอาลักษณะของสเตปมอเตอร์ทั้งสองแบบแรกเข้าด้วยกัน

ลักษณะ โครงสร้างแบบง่าย ๆ ของสเตปมอเตอร์ชนิด 4 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 36 ในรูปที่ 37 เป็นการแสดงตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  ของสเตปมอเตอร์ถูกกระตุ้นพร้อมกัน ส่วนในรูปที่ 38 เป็นการแสดงตำแหน่งต่าง ๆ ของ



รูปที่ 37. แสดงตำแหน่งของ โรเตอร์ เมื่อ  $\phi_1$  และ  $\phi_2$  ของ สเตปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส ถูกกระตุ้นพร้อมกัน

เฟสที่ถูกกระตุ้น	$\phi_1$	$\phi_1 \cdot \phi_2$	$\phi_2$	$\phi_2 \cdot \phi_3$	$\phi_3$	$\phi_3 \cdot \phi_4$	$\phi_4$	$\phi_4 \cdot \phi_1$
ตำแหน่งโรเตอร์								

รูปที่ 38. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโรเตอร์ และเฟสต่าง ๆ ที่ถูกกระตุ้น

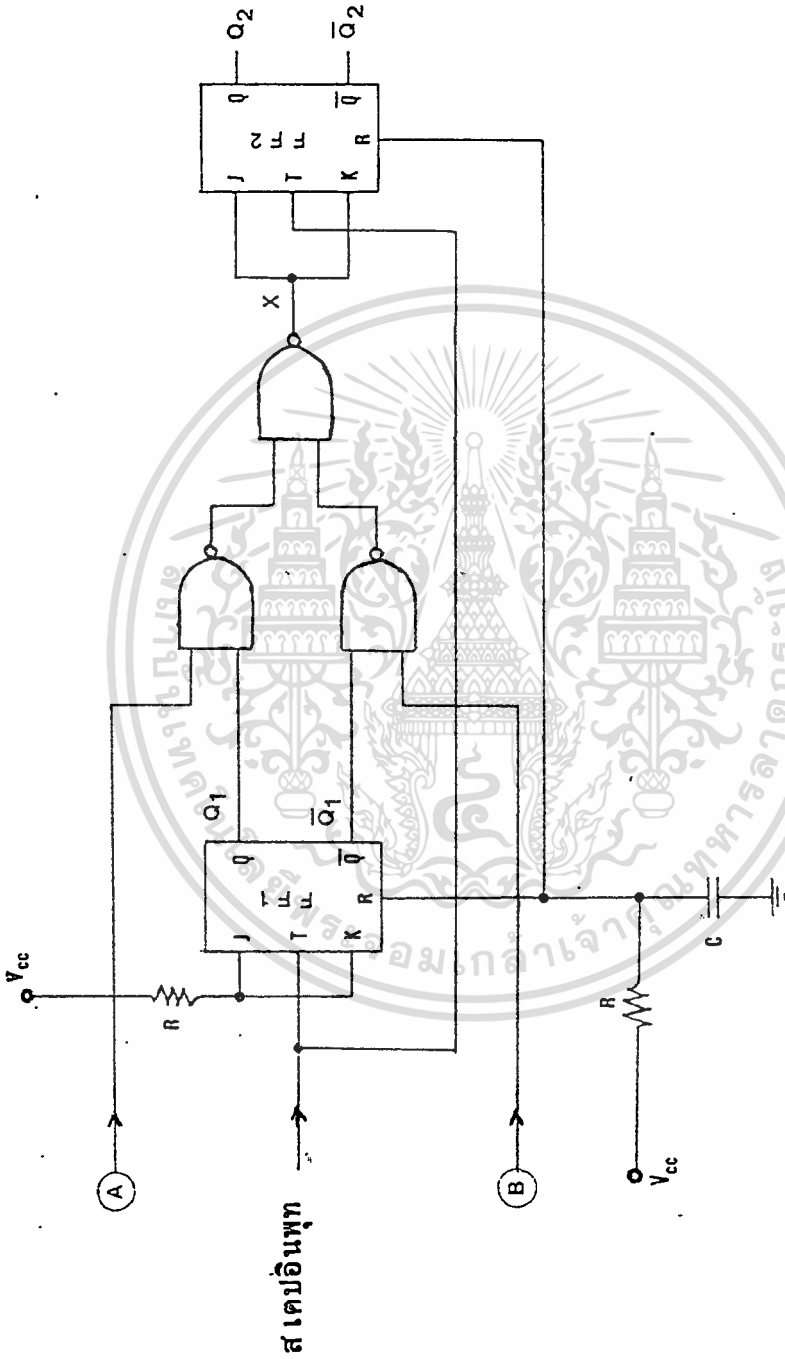
การกระตุ้นเฟส				
ลำดับชั้น	$\varnothing_1$	$\varnothing_2$	$\varnothing_3$	$\varnothing_4$
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

ตารางที่ 2. การกระตุ้นสเตปป์งมอเตอร์ 4 เฟส แบบกระตุ้น  
ครั้งละ 2 เฟส ให้หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

การกระตุ้นเฟส				
ลำดับชั้น	$\varnothing_1$	$\varnothing_2$	$\varnothing_3$	$\varnothing_4$
1	1	1	0	0
2	1	0	0	1
3	0	0	1	1
4	0	1	1	0

ตารางที่ 3. การกระตุ้นสเตปป์งมอเตอร์ 4 เฟส แบบกระตุ้น  
ครั้งละ 2 เฟส ให้หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 39. วงจรนับขึ้น-นับลง

ลำดับชั้น									
เอาท์พุท	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_1$	0	1	0	1	0	1	0	1	0
$Q_2$	0	0	1	1	0	0	1	1	0

ตารางที่ 4. เมื่อ  $A = 0$  และ  $B = 1$  วงจรจะนับขึ้น

ลำดับชั้น									
เอาท์พุท	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_1$	0	1	0	1	0	1	0	1	0
$Q_2$	0	1	1	0	0	1	1	0	0

ตารางที่ 5. เมื่อ  $A = 1$  และ  $B = 0$  วงจรจะนับลง

ลำดับชั้น									
เอาท์พุท	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q <sub>1</sub>	0	1	0	1	0	1	0	1	0
Q <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6. เมื่อ  $A = 0$  และ  $B = 0$  วงจรจะนับกลับไปที่กลับมา  
ระหว่างค่า 00 และ 01

ลำดับชั้น									
เอาท์พุท	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q <sub>1</sub>	0	1	0	1	0	1	0	1	0
Q <sub>2</sub>	0	1	0	1	0	1	0	1	0

ตารางที่ 7. เมื่อ  $A = 1$  และ  $B = 1$  วงจรจะนับกลับไปที่กลับมา  
ระหว่างค่า 00 และ 11

ลำดับชั้น	อินพุต		เอาต์พุต			
	$Q_2$	$Q_1$	$\emptyset_1$	$\emptyset_2$	$\emptyset_3$	$\emptyset_4$
1	0	0	1	1	0	0
2	0	1	0	1	1	0
3	1	0	0	0	1	1
4	1	1	1	0	0	1

ตารางที่ 8. ตารางแสดงค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับที่ลำดับชั้นต่าง ๆ ในกรณีที  
สแตปป์มอเตอร์ถูกกระตุ้น ครั้งละ 2 เฟส ให้แกนหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

ลำดับชั้น	อินพุต		เอาต์พุต			
	$Q_2$	$Q_1$	$\emptyset_1$	$\emptyset_2$	$\emptyset_3$	$\emptyset_4$
1	0	0	1	1	0	0
2	1	1	1	0	0	1
3	1	0	0	0	1	1
4	0	1	0	1	1	0

ตารางที่ 9. ตารางแสดงค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับที่ลำดับชั้นต่าง ๆ ในกรณีที  
สแตปป์มอเตอร์ถูกกระตุ้น ครั้งละ 2 เฟส ให้แกนหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์เมื่อเฟสต่าง ๆ ของสเตปป์มอเตอร์ถูกกระตุ้น

จากรูปที่ 38 จะเห็นว่าเราสามารถแบ่งการกระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้มันหมุนไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างต่อเนื่องได้ 3 แบบ คือ

1. การกระตุ้นครั้งละ 1 เฟส เป็นการจ่ายกระแสให้กับสเตเตอร์ ครั้งละ 1 เฟส เรียงลำดับกันไป คือ  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  และ  $\theta_4$  หมุนเวียนกันไป จะทำให้สเตปป์มอเตอร์หมุนไปที่ละสเตปอย่างต่อเนืองในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรืออาจจะกระตุ้นครั้งละ 1 เฟส เรียงลำดับกลับกัน คือ  $\theta_4, \theta_3, \theta_2$  และ  $\theta_1$  หมุนเวียนกันไปจะทำให้มอเตอร์หมุนไปที่ละสเตปอย่างต่อเนือง แต่มีทิศการหมุนตรงกันข้ามกับกรณีแรก

2. การกระตุ้นครั้งละ 2 เฟส เป็นการจ่ายกระแสให้กับสเตเตอร์ครั้งละ 2 เฟส เรียงลำดับกันไป คือ  $\theta_1\theta_2, \theta_2\theta_3, \theta_3\theta_4$  และ  $\theta_4\theta_1$  หมุนเวียนกันไป หรือถ้าเรียงลำดับการกระตุ้นกลับกันคือ  $\theta_4\theta_1, \theta_3\theta_4, \theta_2\theta_3$  และ  $\theta_1\theta_2$  หมุนเวียนกันไป จะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศกับกรณีแรก

3. การกระตุ้นครั้งละ 1 และ 2 เฟสสลับกัน ในกรณีนี้จะจ่ายกระแสให้กับสเตเตอร์ ครั้งละ 1 เฟส และ 2 เฟส เรียงลำดับสลับกันไป คือ  $\theta_1, \theta_1\theta_2, \theta_2, \theta_2\theta_3, \theta_3, \theta_3\theta_4, \theta_4$  และ  $\theta_4\theta_1$  หมุนเวียนกันไป หรือถ้าเรียงลำดับการกระตุ้นเวียนกลับด้านกันจะทำให้มอเตอร์หมุนกลับไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับตอนแรก

สเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ในภาคทดลองนั้น เป็นแบบแม่เหล็กถาวร มี 4 เฟสของบริษัท JAPAN SERVO รุ่น KP8 M2-002 มีมุมในการสเตป 1.8 องศาต่อสเตป ใช้การกระตุ้นแบบครั้งละ 2 เฟส เพราะการกระตุ้นแบบนี้จะให้แรงบิดได้สูงสุด สำหรับลำดับขั้นการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้แกนของมอเตอร์นี้หมุนในทิศทางเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาเป็นไปตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ลำดับขั้นการกระตุ้นของทั้งกรณีหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาจะเริ่มจาก ขั้นที่ 1 ไปสู่ขั้นที่ 2 แล้วไปสู่ขั้นที่ 3 และขั้นที่ 4 ตามลำดับ จากนั้นจะเวียนไปเริ่มต้นขั้นที่ 1 ใหม่แล้วเวียนไปขั้นอื่น ๆ ซ้ำแบบเดิมที่ได้กล่าวมาแล้ว จะทำให้แกนของสเตปป์มอเตอร์หมุนไปเป็นสเตปอย่างต่อเนื่องในทิศทางที่ต้องการ

การจัดเรียงลำดับการกระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสเตปป์มอเตอร์ให้เป็นไปตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3 กระทำได้โดยการใช้วงจรเรียงลำดับตรรก (logic sequencer) วงจรนี้ประกอบไปด้วยวงจรรนับแบบวงแหวน (ring counter) และวงจรถอดรหัสการนับ (decoder) [15] วงจรรนับนี้จะใช้วงจรแบบที่สามารถนับขึ้นหรือนับลงได้ เพราะการนับขึ้นหรือนับลงจะมีผลต่อทิศทางการหมุนของแกนของสเตปป์มอเตอร์ ในกรณีของสเตปป์มอเตอร์ 4 เฟส ที่ใช้การกระตุ้นครั้งละ 2 เฟส จะได้

วงจรมีดังแสดงในรูปที่ 39 วงจรนี้ [16] ประกอบด้วย ฟลิป-ฟลอป แบบ JK (JK flip-flop) 2 ตัว และแนนด์เกต (NAND gate) 3 ตัว สัญญาณที่เข้าทางด้านอินพุต (step input) มีลักษณะเป็นสัญญาณนาฬิกา (clock) หรือพัลส์ ฟลิป-ฟลอป FF1 จะเปลี่ยนสถานะ (toggle) ทุกครั้งที่มีสัญญาณนาฬิกาเข้ามา ส่วนฟลิป-ฟลอป FF2 จะเปลี่ยนสถานะทุกครั้งเมื่อมีสัญญาณนาฬิกาเข้ามา 2 ลูก สถานะของ A และ B จะเป็นตัวกำหนดการนับว่าเป็นการนับขึ้นหรือนับลง ถ้า  $A=0$  และ  $B=1$  วงจรจะนับขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4 โดย  $Q_1$  จะเป็นหลักแรกและ  $Q_2$  เป็นหลักที่สองของการนับแบบเลขฐานสอง ถ้า  $A=1$  และ  $B=0$  วงจรจะนับลง ดังแสดงในตารางที่ 5 ถ้า  $A=0$  และ  $B=0$  วงจรจะนับกลับไปที่ค่าสองค่า คือ 00 และ 01 ดังแสดงในตารางที่ 6 ถ้า  $A=1$  และ  $B=1$  วงจรจะนับกลับไปที่ค่าสองค่า คือ 00 และ 11 ดังแสดงในตารางที่ 7

สถานะของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะถูกต่อเข้าไปที่อินพุตของวงจรถอดรหัสการนับ วงจรนี้จะมีเอาต์พุต 4 เอาต์พุตสอดคล้องกับจำนวนเฟสของสเตปป์มอเตออร์ การจัดเรียงลำดับของตรรกะที่ลำดับชั้นต่าง ๆ ของเอาต์พุตจะต้องสอดคล้องกับการจัดเรียงลำดับของตรรกะที่ลำดับชั้นต่าง ๆ ในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 แล้วแต่กรณี การออกแบบวงจรถอดรหัสการนับจะพิจารณาจากตารางแสดงค่าความจริงระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสการนับที่ลำดับชั้นต่าง ๆ ในกรณีที่สเตปป์มอเตออร์ถูกกระตุ้นครั้งละ 2 เฟสให้แกนมุมนไปในทิศทางเข็มนาฬิกา จะได้ตารางแสดงค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับดังตารางที่ 8 ในทำนองเดียวกันในกรณีที่แกนมุมนไปในทิศทางเข็มนาฬิกา จะได้ตารางแสดงค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับดังตารางที่ 9 จากตารางที่ 8 และตารางที่ 9 นำไปสร้างแผนภาพคาร์นอจ (Karnaugh map) ของ  $\emptyset_1, \emptyset_2, \emptyset_3$  และ  $\emptyset_4$  ดังรูปที่ 40 ถึงรูปที่ 43 ตามลำดับ

จากรูปที่ 40 จะได้

$$\begin{aligned}\emptyset_1 &= Q_1Q_2 + \overline{Q_1}\overline{Q_2} \\ &= \overline{Q_1Q_2} \cdot \overline{\overline{Q_1}\overline{Q_2}}\end{aligned}\quad (50)$$

จากรูปที่ 41 จะได้

	$\bar{Q}_2$	$Q_2$
$\bar{Q}_1$	1	0
$Q_1$	0	1

รูปที่ 40. แผนภาพคาร์นอร์ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับ  
ในกรณีของ  $\emptyset_1$

	$\bar{Q}_2$	$Q_2$
$\bar{Q}_1$	1	0
$Q_1$	1	0

รูปที่ 41. แผนภาพคาร์นอร์ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับ  
ในกรณีของ  $\emptyset_2$

	$\bar{0}_2$	$0_2$
$\bar{0}_1$	0	1
$0_1$	1	0

รูปที่ 42. แผนภาพคาร์นอร์จ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับ  
ในกรณีของ  $\emptyset_3$



	$\bar{0}_2$	$0_2$
$\bar{0}_1$	0	1
$0_1$	0	1

รูปที่ 43. แผนภาพคาร์นอร์จ จากตารางค่าความจริงของวงจรถอดรหัสการนับ  
ในกรณีของ  $\emptyset_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\phi_2 &= Q_1\bar{Q}_2 + \bar{Q}_1Q_2 \\ &= \overline{Q_1Q_2} \cdot \overline{Q_1Q_2}\end{aligned}\quad (51)$$

จากรูปที่ 42 จะได้

$$\begin{aligned}\phi_3 &= Q_1\bar{Q}_2 + \bar{Q}_1Q_2 \\ &= \overline{Q_1Q_2} \cdot \overline{Q_1Q_2}\end{aligned}\quad (52)$$

จากรูปที่ 43 จะได้

$$\begin{aligned}\phi_4 &= Q_1Q_2 + \bar{Q}_1\bar{Q}_2 \\ &= \overline{Q_1Q_2} \cdot \overline{Q_1Q_2}\end{aligned}\quad (53)$$

จากสมการที่ (50), (51), (52) และสมการที่ (53) จะได้วงจรถอดรหัสการนับตั้งรูปที่ 44 เนื่องจากปริมาณกระแสที่ออกจากวงจรวอร์เรียมลำดับตรรกมีค่าต่ำไม่เพียงพอที่จะไปกระตุ้นให้เฟสต่างๆ ของสแตมป์มอเตอร์ทำงานได้จึงต้องต่อเอาที่พุทของวงจรวอร์เรียมลำดับตรรกเข้ากับวงจรมอเตอร์ (driver) เพื่อขยายกระแสดังกล่าวให้มากพอแล้วต่อไปขับเฟสต่าง ๆ ของสแตมป์มอเตอร์ให้ทำงานต่อไป

วงจรมอเตอร์ [15] ทำหน้าที่ขยายกระแส เพื่อใช้ไปขับเฟสต่าง ๆ ของสแตมป์มอเตอร์ วงจรมอเตอร์มีหลายแบบ อาจประกอบด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง (power transistor) 1 หรือ 2 ตัว ในภาคการทดลอง จะใช้วงจรมอเตอร์แบบ 4 เฟส ดังรูปที่ 45 แต่ละเฟสจะใช้ทรานซิสเตอร์กำลัง 2 ตัว นอกจากทรานซิสเตอร์เหล่านี้จะทำหน้าที่ขยายกระแสเพื่อให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดมอเตอร์ของสแตมป์มอเตอร์ได้อย่างเพียงพอแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ปิด-เปิด กระแสให้ไหลผ่านขดลวดมอเตอร์เป็นจังหวะ ตามสถานะของตรรกทางด้านเอาต์พุทของวงจรวอร์เรียมลำดับตรรก ดังนั้นทรานซิสเตอร์เหล่านี้จะต้องมีอัตราการทนกระแสได้สูงเพราะในแต่ละเฟสต้องการกระแสไฟฟ้าสูง เช่น สแตมป์มอเตอร์ที่ใช้ในภาคทดลองนี้ต้องการกระแสเฟสละ 1.1 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ใช้งาน 5.5 โวลต์ ในกรณีนี้สแตมป์มอเตอร์

เป็นแบบ 4 เฟส จะต้องใช้วงจรขับสแตมป์มอเตอร์ 4 ชุด กล่าวคือใช้ 1 ชุด ต่อ 1 เฟส ต่อเอาท์พุทของวงจรเรียงลำดับตรรกเข้าทางด้านอินพุทของวงจรขับสแตมป์มอเตอร์ ใช้ 1 เอาท์พุทต่อวงจรขับสแตมป์มอเตอร์ 1 ชุด และวงจรขับสแตมป์มอเตอร์จะถูกต้องเข้ากับสเตเตอร์เฟสต่าง ๆ เฟสละ 1 ชุด ให้สอดคล้องกับเฟสของเอาท์พุทของวงจรเรียงลำดับตรรก เช่น  $\theta_1$  ของสเตเตอร์จะต่อกับวงจรขับสแตมป์มอเตอร์ชุดที่ต่อกับเอาท์พุท  $\theta_1$  ของวงจรเรียงลำดับตรรก การเชื่อมต่อสำหรับ  $\theta_2, \theta_3$  และ  $\theta_4$  ก็จะกระทำในทำนองเดียวกันนี้ นั่นคือ เฟสต่าง ๆ ของสแตมป์มอเตอร์ จะถูกกระตุ้นตามลำดับขั้นเป็นไปตามตารางที่ 2 หรือ ตารางที่ 3 แล้วแต่กรณี

เนื่องจาก ทรานซิสเตอร์ในวงจรขับสแตมป์มอเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ปิด-เปิดกระแสที่ไหลผ่านขดสเตเตอร์ เมื่อทรานซิสเตอร์นี้หยุดนำกระแสจะทำให้เกิดความต่างศักย์ค่าสูง (high voltage) จำนวนหนึ่งตกคร่อมบนทรานซิสเตอร์เหล่านั้นอันเนื่องมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในอินดักแตนซ์  $L(di/dt)$  และความต่างศักย์นี้อาจเป็นอันตรายต่อทรานซิสเตอร์ชุดนั้น วิธีการลดความต่างศักย์ที่มียอดแหลม (spike voltage) และการป้องกันไม่ให้ทรานซิสเตอร์เสียหายกระทำได้โดยใช้ซัพเพรสเซอร์ (suppressors) [15] เป็นวงจรช่วยปิด (turn-off circuit) ไม่ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในอินดักแตนซ์มีมากเกินไป ซัพเพรสเซอร์ที่สามารถนำมาใช้ในกรณีนี้มีหลายแบบคือ ซัพเพรสเซอร์แบบไดโอด (diode suppressor) ซัพเพรสเซอร์แบบไดโอดและความต้านทาน (diode-resistor suppressor) ซัพเพรสเซอร์แบบซีเนอร์ไดโอด (zener diode suppressor) และซัพเพรสเซอร์แบบคอนเดนเซอร์ (condenser suppressor) สำหรับวงจรซัพเพรสเซอร์ที่ใช้ในภาคการทดลองนั้น จะเป็นแบบใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุจำนวน 2 ชุด ต่อคร่อมระหว่างขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลังของเฟสที่ 1 กับขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์กำลังของเฟสที่ 3 และต่อในทำนองเดียวกันระหว่างเฟสที่ 2 กับเฟสที่ 4 ดังรูปที่ 45 ความต้านทาน  $R_9$  กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  และความต้านทาน  $R_{10}$  กับตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำหน้าที่เป็นวงจรซัพเพรสเซอร์ดังกล่าว โดย  $C_1$  และ  $C_2$  ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสระหว่างเฟสที่ 1 กับเฟสที่ 3 และเฟสที่ 2 กับเฟสที่ 4 ความต้านทาน  $R_9$  และ  $R_{10}$  ทำหน้าที่เป็นตัวถ่วงกระแสให้เกิดการสลายตัวในรูปของความร้อน จึงให้อัตราการเปลี่ยนแปลง  $di/dt$  บนขดลวดสเตเตอร์มีค่าไม่สูงจนเกินไป ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนทรานซิสเตอร์กำลังอยู่ในช่วงปลอดภัยที่สามารถทนได้

พิจารณาการทำงานของวงจรในรูปที่ 45 จากตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 การกระตุ้นสแตมป์มอเตอร์ 4 เฟส แบบกระตุ้นครั้งละ 2 เฟส จะพบว่าในแต่ละลำดับ

ชั้น เฟสที่ 1 กับเฟสที่ 3 จะไม่มีโอกาสเปิดหรือปิดพร้อม ๆ กัน และในท่านองเดียวกัน เฟสที่ 2 กับเฟสที่ 4 จะไม่มีโอกาสเปิดหรือปิดพร้อม ๆ กัน ในกรณีที่เฟสที่ 1 ถูกกระตุ้นให้นำกระแส เฟสที่ 3 จะไม่ถูกกระตุ้น ขณะนี้ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  จะนำกระแสอยู่ในช่วงอิมิตัว ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม  $Q_2 (V_{CE})$  จะมีค่าเป็นศูนย์ จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์  $L_1$  ในขณะเดียวกัน ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะถูกประจุผ่านขดลวดสเตเตอร์  $L_3$  และความต้านทาน  $R_9$  อย่างรวดเร็วจนมีค่าความต่างศักย์ตกคร่อมบนตัวเก็บประจุเท่ากับ  $V_{CC}$  เราสามารถหาค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวด  $L_1$  ในสภาวะสม่ำเสมอ (steady state) ได้ดังนี้

$$I_m = \frac{V_{CC}}{R_m} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } I_m &= \text{กระแสที่ไหลผ่านขดลวด } L_1 \\ V_{CC} &= \text{ความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายกำลัง} \\ R_m &= \text{ความต้านทานภายในของขดลวดสเตเตอร์ } L_1 \end{aligned}$$

ต่อมาที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$  เฟสที่ 1 หยุดนำกระแส เฟสที่ 3 จะถูกกระตุ้นให้นำกระแสพอดี ทรานซิสเตอร์  $Q_4$  จะนำกระแสอยู่ในสภาวะอิมิตัว ทำให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบน  $Q_4$  มีค่าเป็นศูนย์ ในสภาวะเริ่มต้นที่เวลา  $t = 0+$  จะพบว่ายังคงมีกระแสไหลผ่านขดลวด  $L_1$  เท่ากับ  $I_m$  กระแสนี้จะไม่สามารถลดลงเป็นศูนย์ในทันทีทันใดได้ และจะไหลผ่านความต้านทาน  $R_9$  พร้อมทำการประจุให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  ผ่านทรานซิสเตอร์  $Q_4$  ไปสู่กราวด์ กระแสนี้จะถูกถ่วงให้มีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วพร้อมสลายตัวในรูปความร้อนบนความต้านทาน  $R_9$  ในขณะเดียวกันที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0+$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ซึ่งถูกประจุให้มีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ  $V_{CC}$  อยู่ก่อนหน้านี้แล้วจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นค่าอื่นในทันทีทันใด ดังนั้นที่เวลาเริ่มต้นนี้ จะได้ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขาคอลเลคเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ ( $V_{CE}$ ) ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  เป็น

$$V_{CE} = I_m R_9 - V_{CC} \quad (55)$$

ค่า  $V_{CE}$  ที่ได้นี้ต้องมีค่าไม่เกินค่า  $V_{CE(max)}$  ของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และทรานซิสเตอร์  $Q_2$  เพราะถ้ามีค่าเกินค่านี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์ดังกล่าวเสียหาย เมื่อพิจารณาจาก

สมการ (55) แล้วจะเห็นว่า ค่า  $I_m$  และ  $V_{CC}$  มีค่าคงที่ ตัวที่จะกำหนดขนาดของ  $V_{CE}$  คือ  $R_0$  ดังนั้นเราต้องเลือกค่า  $R_0$  ไม่ให้มีค่ามากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และทรานซิสเตอร์  $Q_2$  มากเกินค่าที่สามารถจะทนได้ และค่า  $R_0$  ไม่ควรจะมีค่าน้อยเกินไปเพราะจะทำให้การสลายตัวของกระแสใน  $R_0$  ช้าลง หลังจากกระแสใน  $L_1$  สลายตัวหมดแล้ววงจรนี้จะกลับเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ และค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{CC}$  กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์  $L_3$  จะมีค่าเท่ากับ  $I_m$  (สำหรับสเตปป์มอเตอร์ตัวเดียวกัน ค่าความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์ของแต่ละเฟสจะมีค่าเท่ากัน)

การเลือกค่า  $C_1$  นับว่ามีความสำคัญต่อสเถียรภาพของวงจรเพราะถ้าค่า  $C_1$  มีค่ามากหรือน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการสั่น(oscillation)ของกระแสที่ถูกด่วง โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาให้การทำงานของวงจร RLC นี้อยู่ใกล้จุดด่วงวิกฤต(critically damped)มากที่สุด ในกรณีนี้จะ ได้

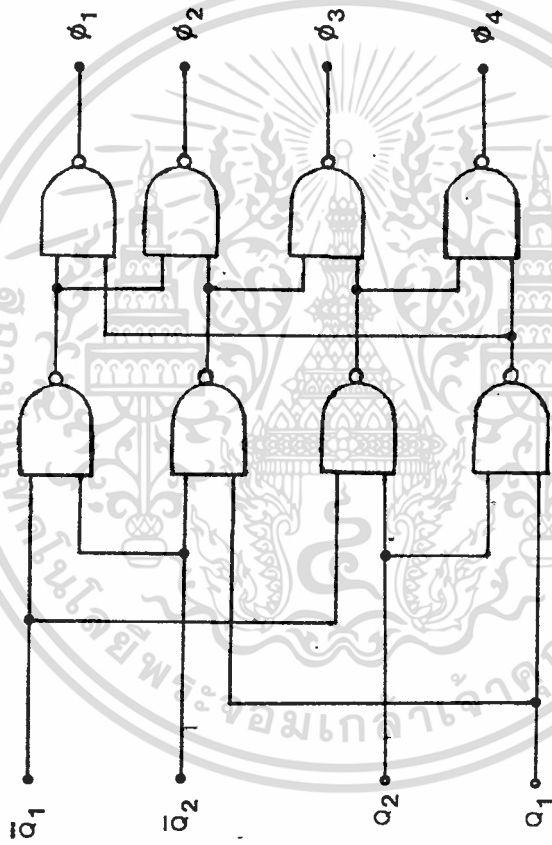
$$\frac{R_0^2}{4L_1^2} = \frac{1}{L_1 C_1} \quad (56)$$

โดยค่า  $L_1$  จะถูกกำหนดด้วยคุณลักษณะเฉพาะของสเตปป์มอเตอร์ และค่า  $R_0$  ถูกบังคับด้วยค่าจากสมการ (55) ดังนั้น จะหาค่า  $C_1$  ได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{4L_1}{R_0^2} \quad (57)$$

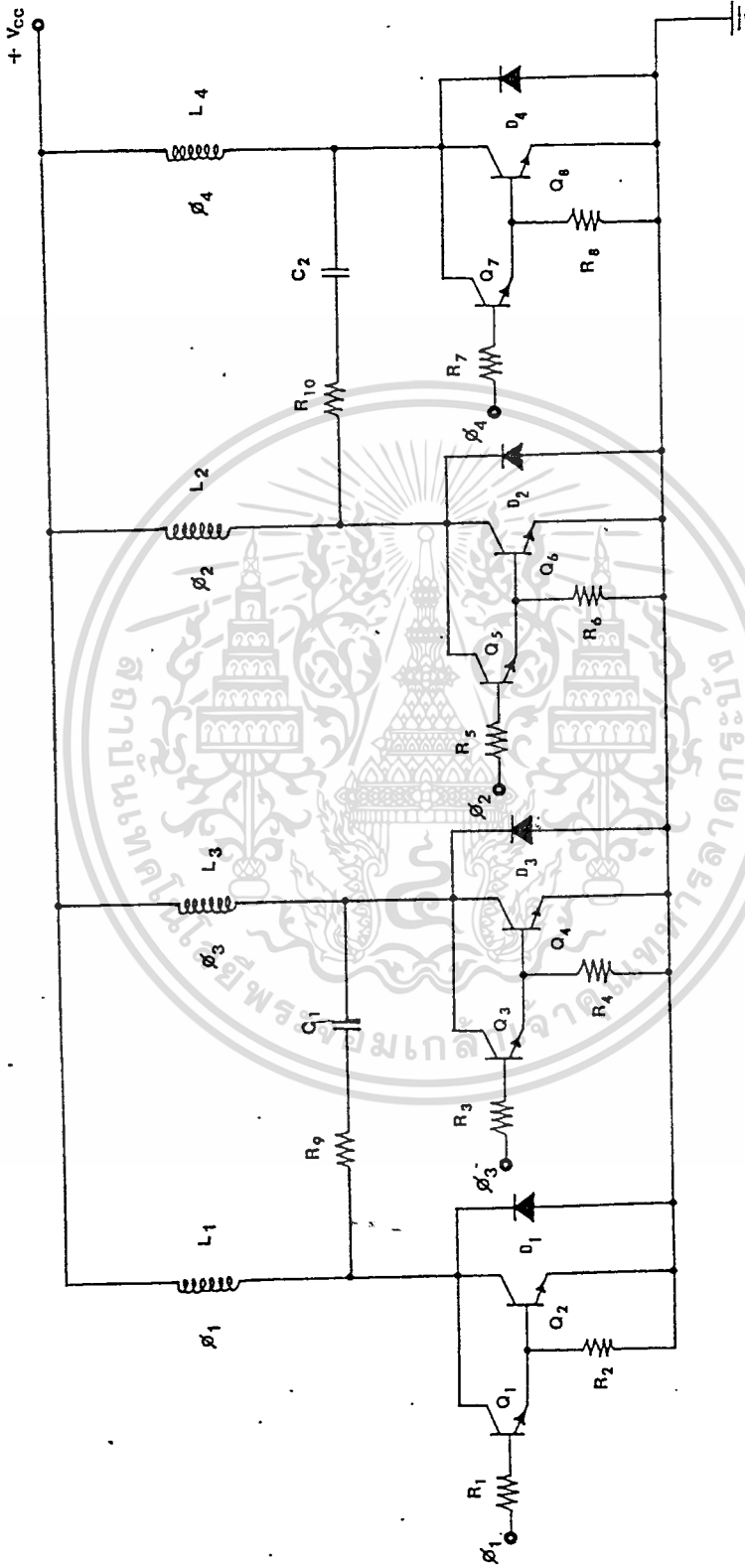
ในเวลาต่อมา เมื่อเฟสที่ 3 หยุดนำกระแส และเฟสที่ 1 จะนำกระแสพอดี เหตุการณ์ที่กล่าวผ่านมานี้จะเกิดขึ้นกับขดลวดสเตเตอร์  $L_3$ ,  $R_0$  และ  $C_1$  ค่าความต่างศักย์  $V_{CE}$  ที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์  $Q_3$  และ  $Q_4$  จะเป็นเช่นเดียวกับกรณีของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ในทำนองเดียวกัน เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นกับกรณีของเฟสที่ 2 กับเฟสที่ 4 ด้วย โดยทั่วไปแล้วในสเตปป์มอเตอร์ตัวเดียวกัน ค่า  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  และ  $L_4$  จะมีค่าเท่ากัน หรือใกล้เคียงกันมาก ไคโอด  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  และ  $D_4$  ที่ต่อคร่อมทรานซิสเตอร์  $Q_2$ ,  $Q_4$ ,  $Q_6$ , และ  $Q_8$  ตามลำดับ ทำหน้าที่ป้องกันทรานซิสเตอร์แต่ละตัวในกรณีเกิดแรงดันกระแสบย้อนกลับบนทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้น

ในภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ใน 1 แนวแกน จะประกอบไปด้วยวงจรรีเลย์ลำดับตรรก 1 ชุด วงจรขับสแตมป์มอเตอร์ (จำนวนเท่ากับเฟสของสแตมป์มอเตอร์ที่จะนำมาใช้งาน) และ สแตมป์มอเตอร์ 1 ตัว เพื่อควบคุมให้ระบบหันไป-มาได้ ใน 1 แนวแกน (สองทิศทางที่ตรงกันข้าม) ความเร็วของการหมุนของสแตมป์มอเตอร์ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณนาฬิกา (step input) ที่ป้อนเข้าไปในวงจรรีเลย์ลำดับตรรก ในวงจรรีเลย์ลำดับตรรกจะมีที่ป้อนสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุนของสแตมป์มอเตอร์ 2 แห่ง จากรูปที่ 39 A และ B คือ จุดที่จะถูกป้อนสัญญาณเข้าไปควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของระบบใน 1 แนวแกน ถ้า  $A=0$  และ  $B=1$  ระบบจะถูกควบคุมให้หันไปในทิศทางหนึ่ง และถ้า  $A=1$  และ  $B=0$  ระบบจะถูกควบคุมให้หันไปในทิศทางอีกทิศทางหนึ่งที่ตรงข้ามกับกรณีแรก ส่วน ถ้า  $A=0$  และ  $B=0$  หรือ  $A=1$  และ  $B=1$  นั้น จะมีผลทำให้สแตมป์มอเตอร์สลับกลับไป-กลับมากลับมาใน 1 สเต็ป ซึ่งเป็นมุมน้อยมาก (ประมาณ 1.8 องศา) จนถึงได้ว่าไม่มีผลต่อการทำให้ระบบหันไปในทางทิศใดทิศหนึ่ง ดังที่กล่าวผ่านมาแล้วว่า ในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบ มีตัวรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้า 4 ตัว และมีวงจรถอดรหัสสัญญาณจากตัวรับสัญญาณแสง ตัวละ 1 วงจร (รวมทั้งหมดมี 4 วงจร) ถ้าตัวรับสัญญาณแสงตัวใดรับสัญญาณแสงที่ตรงกับที่ออกแบบไว้ได้จะทำให้เอาต์พุทของวงจรถอดรหัสที่คู่ร่วมกับตัวรับสัญญาณแสงนั้นอยู่ในสถานะค่าหรือพูดอีกนัยหนึ่ง คือ เอาต์พุทมีสถานะเป็น 0 แต่ถ้าตัวรับสัญญาณตัวใดรับสัญญาณดังกล่าวยังไม่ได้เอาต์พุทของวงจรถอดรหัสชุดนั้นจะอยู่ในสถานะสูงหรือพูดอีกนัยหนึ่ง คือ เอาต์พุทมีสถานะเป็น 1 ดังนั้นถ้าต่อเอาต์พุทของวงจรถอดรหัสตัวรับสัญญาณแสงตัวหนึ่ง เข้าที่จุด A ของวงจรในรูปที่ 39 แล้ว ที่จุด B ที่เหลือจะถูกต่อเข้ากับเอาต์พุทของวงจรถอดรหัสตัวรับสัญญาณแสงอีกตัวหนึ่งที่ติดตั้งไว้รับสัญญาณแสงที่จะมาจากด้านตรงกันข้าม จากรูปที่ 16 และรูปที่ 33 ถ้าเอาต์พุทของวงจรถอดรหัสตัวรับสัญญาณแสง  $D_1$  ถูกต่อเข้ากับจุด A ของวงจรในรูปที่ 39 แล้ว ที่จุด B จะถูกต่อด้วยเอาต์พุทของวงจรถอดรหัสตัวรับสัญญาณแสง  $D_2$  เนื่องจากในระบบติดตามเป้าหมายมีชุดควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ที่ 2 ชุด ควบคุมให้ระบบสามารถหันไปได้ใน 2 แนวที่ตั้งฉากกัน ดังนั้น ใน 1 ระบบจะประกอบไปด้วยสแตมป์มอเตอร์ 2 ตัว และมีวงจรรีเลย์ลำดับตรรกอยู่ 2 ชุด ชุดแรกมี A และ B เป็นจุดรับสัญญาณควบคุมทิศทางดังได้กล่าวมาแล้ว ถ้าให้  $A'$  และ  $B'$  เป็นจุดรับสัญญาณควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของชุดหลัง และเอาต์พุทของวงจรถอดรหัสตัวรับสัญญาณแสง  $D_3$  (จากรูปที่ 16) ต่อกับ  $A'$  แล้ว ที่  $B'$  จะถูกต่อด้วยเอาต์พุทของวงจรถอดรหัสตัวรับสัญญาณแสง  $D_4$  เมื่อตัวรับสัญญาณแสงทางด้านใดรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่เกิดจากการชี้เป้าได้ ระบบติดตามเป้าหมายจะถูกบังคับให้หันเข้าหาตำแหน่งที่เป้านั้นอยู่ การตอบ



รูปที่ 44. วงจรถอดรหัสการนับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 45. วงจรขับสแตมป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส แต่ละเฟสใช้ทรานซิสเตอร์  
กำลัง 2 ตัวในการขับเคลื่อน

สนองต่อทิศทางดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ลักษณะของการเชื่อมโยงวงจรต่าง ๆ ในระบบติดตามเป้าหมายที่ได้กล่าวผ่านมาทั้งหมดในบทนี้ สำหรับการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ใน 1 แนวแกนได้แสดงไว้แล้วในผังการเชื่อมโยงในรูปแบบที่ 11 ส่วนในระบบติดตามเป้าหมายที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยชุดวงจรดังที่กล่าวนี้ จำนวน 2 ชุดที่เหมือนกันและเป็นอิสระจากกัน

ในบทนี้ทำให้เราทราบลักษณะของสัญญาณแสง เลเซอร์ที่จะใช้ในอุปกรณ์ซีเป้าด้วยเลเซอร์ และทราบการทำงานของวงจรภาคต่าง ๆ ภายในระบบติดตามเป้าหมายเพื่อประกอบกันเป็นระบบติดตามเป้าหมายที่สมบูรณ์ จากคุณสมบัติและหลักการดังกล่าวจะนำไปสร้างวงจรสำหรับทำการทดลอง เพื่อนำไปสู่ความเป็นจริงที่สามารถจะนำไปประยุกต์ใช้งานได้



### บทที่ 3

#### การสร้างวงจรทดลอง และการทดสอบวงจร

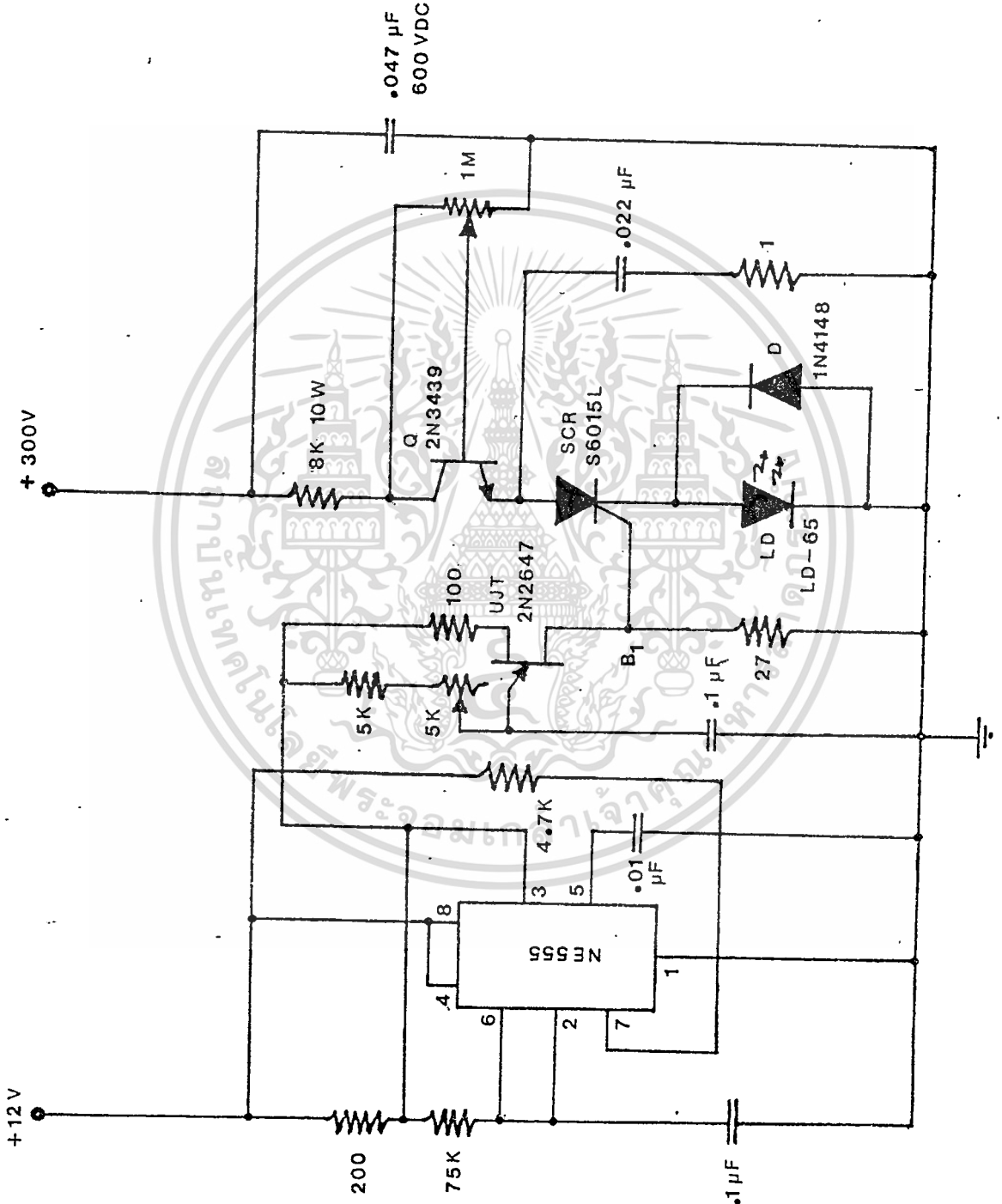
จากบทที่ผ่านมาเป็นการกล่าวถึงระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ในเชิงทฤษฎีและความเป็นไปได้ ส่วนในบทนี้จะนำผลที่ได้จากบทที่แล้วมาทำการทดลองว่ามีผลสอดคล้องกันหรือไม่ แต่เนื่องจากจำกัดด้วยงบประมาณและระยะเวลาในการดำเนินการ จึงไม่สามารถที่จะสร้างระบบจริงขึ้นมาทดสอบได้ เพราะต้องใช้เงินจำนวนมาก อุปกรณ์ที่จะใช้มีราคาแพง บางอย่างมีอันตราย ต้องจัดซื้อจัดหาอุปกรณ์บางอย่างจากต่างประเทศ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานที่ยาวนาน ดังนั้นในการทดลองนี้จะใช้การจำลอง (simulation) จากระบบจริง ทั้งในอุปกรณ์ซึ่งเป้าหมายด้วยเลเซอร์ และในระบบติดตามเป้าหมาย อย่างไรก็ตาม ปรากฏจากการทดลองนี้สามารถนำไปขยายผลใช้ในระบบจริงได้ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบอื่น ๆ ได้

#### 3.1 อุปกรณ์ซึ่งเป้าหมายด้วยเลเซอร์

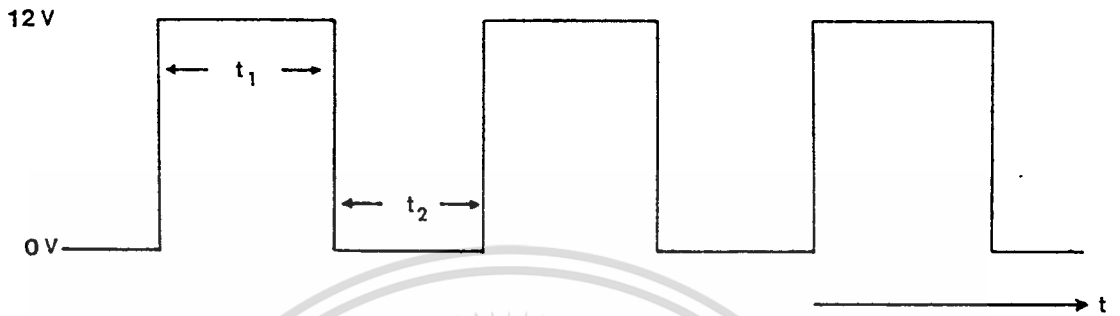
ในการทดลองนี้ ใช้เลเซอร์ไดโอดเบอร์ LD-65 ของ บริษัท Laser Diode, Inc. เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (ดูรูปที่ 9) แสงเลเซอร์ที่ได้อยู่ในย่านอินฟราเรด มีความยาวคลื่น 904 นาโนเมตร มีกำลังของยอดพัลส์สูงสุด 25 วัตต์ กระแสขีดเริ่ม (threshold current) ในการเกิดเลเซอร์มีค่าเท่ากับ 14 แอมแปร์ และกระแสสูงสุดที่เลเซอร์ไดโอดนี้สามารถทนได้ไม่เกิน 40 แอมแปร์ ในการทดลองนี้ จะให้เลเซอร์ไดโอดปลดปล่อยแสงเลเซอร์เป็นแบบพัลส์ ทำได้โดยการปล่อยให้กระแสไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดเป็นแบบพัลส์ เพื่อเป็นการถนอมไม่ให้เลเซอร์ไดโอดถูกใช้งานหนักเกินไปจะใช้กระแสของยอดพัลส์ (peak pulse current) สูงสุดไม่เกิน 25 แอมแปร์ และเพื่อให้เลเซอร์ไดโอดปลดปล่อยสัญญาณแสงเลเซอร์เป็นไปตามที่ต้องการในรูปที่ 5 จะต้องสร้างวงจรเพื่อขับกระแสให้กับเลเซอร์ไดโอด [6] ลักษณะวงจรดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 46 ไอซีเบอร์ 555 ถูกประกอบเป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (astable multivibrator) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมให้กับยูเจที (UJT - unijunction transistor) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมนี้จะถูกจ่ายออกทางด้านเอาต์พุตขาที่ 3 ของไอซีเบอร์ 555 ลักษณะรูปคลื่นดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 47 ความสูงของสัญญาณที่ได้ประมาณ 12 โวลต์ ความกว้างของช่วงเวลา que ที่เอาต์พุตมีคีย์สูง ( $t_1$ ) และความกว้างของช่วงเวลา que ที่เอาต์พุตมีคีย์ต่ำ ( $t_2$ ) หาได้ดังนี้

$$t_1 = 0.693 (R_a + R_b)C \text{ วินาที} \quad (58)$$

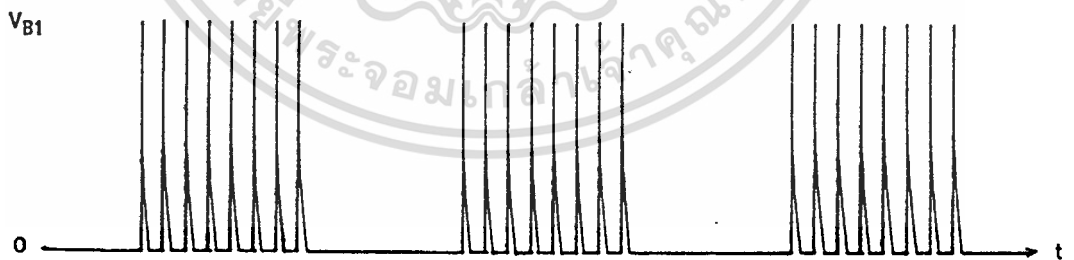
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 46. วงจรของชุดอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณแสงเลเซอร์แบบพัลส์



รูปที่ 47. ลักษณะของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ออกทางขาที่ 3 ของไอซีเบอร์ 555 ในวงจรอะอสเตเบิล



รูปที่ 48. ลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่ออกทางขาเบส 1 ของ บูเจทที่ใช้สำหรับ จุดชนวนเกทของ เอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_2 = 0.693R_bC \text{ วินาที} \quad (59)$$

ในกรณีนี้

$$R_a = 200 \text{ โอห์ม}$$

$$R_b = 75,000 \text{ โอห์ม}$$

$$C = 0.1 \text{ ไมโครฟารัด}$$

จากสมการ (58) และ (59) จะได้

$$t_1 = 5.21 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

$$t_2 = 5.20 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

และจะได้คาบของเวลา T ใน 1 ช่วงคลื่น ดังนี้

$$T = t_1 + t_2 \quad (60)$$

นั่นคือ  $T = 5.21 \times 10^{-3} + 5.20 \times 10^{-3} = 10.41 \times 10^{-3}$  วินาที

จากผลการทดลองวัดค่า  $t_1$ ,  $t_2$  และ T ได้ดังนี้

$$t_1 = 5.30 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

$$t_2 = 5.25 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

$$T = 10.55 \times 10^{-3} \text{ วินาที}$$

จะเห็นว่า การจ่ายกำลังให้กับ ยูเจที ในรูปที่ 46 เป็นแบบปิด-เปิดสลับกันไปด้วยช่วงเวลาปิด-เปิดที่คงที่ โดยมีไอซีเบอร์ 555 เป็นตัวควบคุมการปิด-เปิด ซึ่งมีช่วงเวลาในการเปิดในแต่ละครั้งเท่ากับ  $5.30 \times 10^{-3}$  วินาที และมีช่วงเวลาในการปิดแต่ละครั้งเท่ากับ  $5.25 \times 10^{-3}$  วินาที ยูเจที เบอร์ 2N2647 นี้ ประกอบวงจรเพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรรีแลกเซชันออสซิลเลเตอร์ (relaxation oscillator) [6] ส่งสัญญาณพัลส์เป็นช่วง ๆ ที่คงที่และใช้สัญญาณพัลส์นี้เป็นตัวจุดชนวน (trigger) ให้กับ เกท (gate) ของเอสซีอาร์ (SCR : silicon - controlled rectifier) ที่ต่ออยู่กับขาเบส 1 ( $B_1$ ) ของยูเจทีตัวนี้ คาบเวลาห่างกันของแต่ละช่วงพัลส์ T หาได้จากสูตร

$$T = R_T C_T \ln [1/(1-\eta)] \quad (61)$$

ในกรณีนี้จะ ได้

$$C_T = 0.1 \text{ ไมโครฟารัด}$$

$R_T$  = ผลรวมของความต้านทาน 5 กิโลโอห์ม  
กับค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ (5 กิโลโอห์ม)  
ที่ต่ออนุกรมกันอยู่

และ  $\eta$  คือ ค่าอัตราส่วนอินทรินสิคสแตนออฟ (intrinsic standoff ratio) สำหรับเบอร์ด์ที่นำมาใช้งาน  
นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.51 และ 0.82

ความต้านทาน 5 กิโลโอห์ม ที่ปรับค่าได้ใช้สำหรับปรับค่าความต้านทาน  
ซึ่งจะทำให้ค่า  $R_T$  เปลี่ยนไปและค่า  $T$  จะเปลี่ยนไปด้วย ในการทดลองนี้จะวัดสัญญาณที่  
ออกจากขาเบส 1 ของยูเจที (วัดคร่อมความต้านทาน 27 โอห์ม) แล้วปรับค่าความ  
ต้านทานที่ปรับค่าได้ดังกล่าวจนได้ค่า  $T = 7.4 \times 10^{-4}$  วินาที แล้วจึงหยุดปรับและจะ  
ใช้ค่านี้ตลอดการทดลอง ในกรณีนี้  $R_T$  จะมีค่าประมาณ 6.8 กิโลโอห์ม ดังได้กล่าวมา  
แล้วว่าวงจรรีแลคเซชันออสซิลเลเตอร์นี้ จะถูกเปิดและปิดเป็นจังหวะสลับกันไปด้วยช่วง  
เวลาเปิดและช่วงเวลาปิดที่คงที่แน่นอน ดังรูปที่ 47 ในช่วงเวลาที่กระแสถูกเปิดให้ไหล  
ผ่านวงจรรีแลคเซชันออสซิลเลเตอร์นั้น วงจรนี้จะให้สัญญาณที่เป็นพัลส์อย่างต่อเนื่องออก  
มาที่ขาเบส 1 โดยมีคาบของช่วงเวลาระหว่างแต่ละพัลส์เป็นไปตามสมการ (61) ใน  
ช่วงเวลาที่กระแสถูกปิดไม่ให้ไหลผ่านวงจรนี้ วงจรนี้จะไม่ทำงานและจะอยู่ในสภาวะ  
เงียบสงบ จนกว่ากระแสจะถูกเปิดให้ไหลผ่านวงจรอีกครั้งวงจรก็จะทำงานในลักษณะ  
เดิมที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้น วงจรนี้จะจ่ายสัญญาณในลักษณะที่เป็นกลุ่มของพัลส์เป็นชุด ๆ  
ดังแสดงในรูปที่ 48 เนื่องจากเราใช้ช่วงเวลาที่เปิดให้กระแสไหลเท่ากับ  $5.30 \times 10^{-3}$   
วินาที ช่วงเวลาที่ปิดไม่ให้กระแสไหลเท่ากับ  $5.25 \times 10^{-3}$  วินาที และช่วง  
เวลาระหว่างพัลส์เท่ากับ  $7.4 \times 10^{-4}$  วินาที ดังนั้น ในกลุ่มของสัญญาณพัลส์ 1 ชุด  
จะมีพัลส์อยู่ 8 พัลส์ ช่วงเวลาจากพัลส์แรกถึงพัลส์สุดท้ายในกลุ่มเดียวกันเท่ากับ  $5.2 \times 10^{-3}$   
วินาที ช่วงเวลาจากพัลส์สุดท้ายของกลุ่มแรกถึงพัลส์แรกของกลุ่มถัดไปเท่ากับ  
 $5.4 \times 10^{-3}$  วินาที กลุ่มพัลส์เหล่านี้จะไปจุดชนวน (trig) ขาเกตของเอสซีอาร์ให้  
เอสซีอาร์นำกระแสไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด ในลักษณะที่เป็นกลุ่มพัลส์เช่นเดียวกับกลุ่ม  
พัลส์ที่ใช้เป็นตัวจุดชนวนที่ขาเกตของเอสซีอาร์ เลเซอร์ไดโอดจะปลดปล่อยแสงเลเซอร์  
เป็นกลุ่มของพัลส์ในลักษณะเดียวกันออกมา การทำงานของวงจรส่วนนี้เริ่มจากในขณะ  
ที่ขาเกตของเอสซีอาร์ยังไม่ถูกจุดชนวนด้วยสัญญาณพัลส์เอสซีอาร์จะไม่นำกระแส ขณะนี้  
จะไม่มีกระแสไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด ในขณะเดียวกันกระแสจะไหลผ่านความต้านทาน  
8 กิโลโอห์ม และทรานซิสเตอร์ 2N3439 ไปอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ .022 ไมโคร  
ฟารัด โดยมีความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ 1 เมกะโอห์ม เป็นตัวควบคุมปริมาณกระแสที่

ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ดังกล่าว กระแสที่ไหลผ่านออกจากด้านอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะต้องมีขนาดต่ำกว่ากระแสยึด (holding current) ของเอสซีอาร์ ถ้าไม่เช่นนั้นแล้วเมื่อขาเกทของเอสซีอาร์ถูกจุดชนวน เอสซีอาร์จะอยู่ในสภานำกระแสตลอดไป การจ่ายกระแสผ่านเอสซีอาร์จะไม่มีลักษณะเป็นพัลส์ตามที่ต้องการ หลังจากที่ถูกเก็บประจุได้รับการอัดประจุแล้ว เมื่อมีสัญญาณพัลส์บีมเข้าทางด้านเกทของเอสซีอาร์ที่มีศักย์สูงถึงค่าศักย์ขีดเริ่ม (threshold voltage) ของเกทของเอสซีอาร์ จะทำให้เอสซีอาร์นำกระแสและตัวเก็บประจุจะปลดปล่อยประจุ (discharge) ผ่านเอสซีอาร์และผ่านเลเซอร์ไดโอดอย่างรวดเร็วทำให้เลเซอร์ไดโอดปลดปล่อยแสงเลเซอร์ออกมา หลังจากตัวเก็บประจุปลดปล่อยประจุแล้วจะทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสยึดของเอสซีอาร์ จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส และตัวเก็บประจุจะได้รับการประจุนกว่าเกทของเอสซีอาร์จะถูกจุดชนวนอีกครั้ง เอสซีอาร์จึงจะนำกระแสและตัวเก็บประจุจะปลดปล่อยประจุให้กระแสไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดจะเป็นเช่นนี้เรื่อยไปเนื่องจากสัญญาณพัลส์ที่เป็นตัวจุดชนวนให้กับเกทของเอสซีอาร์มีลักษณะเป็นกลุ่มของพัลส์ดังรูปที่ 48 ดังนั้น แสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมาจากเลเซอร์ไดโอดจะมีลักษณะเป็นกลุ่มพัลส์เช่นเดียวกัน ไดโอดเบอร์ 1N4148 ทำหน้าที่ป้องกันเลเซอร์ไดโอดไม่ได้รับความเสียหายในกรณีเกิดการแกว่งกลับ (backswing, negative transient) ของกระแสหรือความต่างศักย์ ความต้านทาน 1 โอห์ม ที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ .022 ไมโครฟารัด ใช้สำหรับเป็นมอนิเตอร์ของกระแส (current monitor) ของพัลส์ที่เกิดจากการปลดปล่อยประจุของตัวเก็บประจุผ่านเลเซอร์ไดโอด ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนความต้านทาน 1 โอห์ม นี้จะมีค่าเท่ากับค่าของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานนี้ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ตัวเก็บประจุปลดปล่อยผ่านเลเซอร์ไดโอด

ในทางปฏิบัติเนื่องจากเลเซอร์ไดโอดมีราคาแพง การนำมาใช้งานจะต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในวงจรรูปที่ 46 มี 3 ประการสำคัญคือ ประการแรก กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านออกทางอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ 2N3439 จะต้อง มีขนาดต่ำกว่าค่ากระแสยึดต่ำสุด ( $I_H(\min)$ ) ของเอสซีอาร์ S6015L จากตารางคุณสมบัติเฉพาะของเอสซีอาร์ S6015L ได้ค่ากระแสยึดต่ำสุด 40 มิลลิแอมแปร์ วงจรในรูปที่ 46 ในสภานำกระแส เอสซีอาร์และเลเซอร์ไดโอด จะมีความต้านทานต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทาน 8 กิโลโอห์ม ในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ 2N3439 ถูกไบแอสให้ทำงานอยู่ในย่านที่อิ่มตัว จะได้ค่ากระแสที่ไหลออกทางด้านอิมิตเตอร์สูงสุด ( $I_E(\max)$ ) มีค่าโดยประมาณดังนี้

$$I_E(\max) = \frac{300}{8 \times 10^3} = 37.5 \text{ มิลลิแอมแปร์}$$

$$\text{นั่นคือ } I_E(\max) < I_h(\min)$$

แสดงให้เห็นว่า เมื่อกระแสถูกปลดปล่อยออกจากตัวเก็บประจุ .022 ไมโครฟารัด จนหมดแล้ว เอสซีอาร์ สามารถหยุดนำกระแสได้

ประการที่สอง คือ ค่ายอดสูงสุดของพัลส์ของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดจะต้องไม่เกินค่าสูงสุดที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ สำหรับเลเซอร์ไดโอดเบอร์ LD - 56 มีค่ากระแสขีดเริ่ม ( $I_{TH}$ ) 14 แอมแปร์ และค่ากระแสสูงสุด ( $I_{max}$ ) 40 แอมแปร์ เพื่อเป็นการถนอมและยืดอายุการใช้งานของเลเซอร์ไดโอด ในการทดลองจะใช้ค่ากระแสยอดพัลส์สูงสุด 25 แอมแปร์ ค่ากระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด ( $I_D$ ) พิจารณาได้จากสูตรดังนี้

$$I_D = \frac{V_C}{R_T} \quad (62)$$

$$V_C = \text{ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ปลดปล่อยกระแส (.022 ไมโครฟารัด)}$$

$$R_T = \text{ค่าความต้านทานรวมของ เอสซีอาร์ เลเซอร์ ไดโอด และความต้านทาน 1 โอห์ม}$$

เนื่องจากในสภาวะการนำกระแส ค่าความต้านทานของเอสซีอาร์ และเลเซอร์ไดโอด จะมีค่าต่ำมาก  $R_T$  จะมีค่าประมาณ 10 โอห์ม ดังนั้นถ้าให้

$$I_D = 25 \text{ แอมแปร์}$$

$$R_T = 10 \text{ โอห์ม}$$

จาก (62) จะได้

$$V_C = 250 \text{ โวลต์}$$

ค่า  $V_C$  สามารถเปลี่ยนค่าได้โดยการปรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ 1 เมกะโอห์ม ที่ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งค่าความต่างศักย์ป้อนเข้าทางด้านขาเบสของทรานซิสเตอร์ 2N3439 เมื่อตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ปลดปล่อยประจุได้รับการประจุเต็มที่แล้ว ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวเก็บประจุนี้จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ ค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขาเบสของทรานซิสเตอร์ 2N3439 กับกราวด์ เนื่องจากค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ 1 เมกะโอห์ม ทำหน้าที่ปรับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบนตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ปลดปล่อยประจุผ่านเลเซอร์ไดโอด ซึ่งค่าความต่างศักย์นี้มีผลต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดโดยตรง จึงสามารถพูดได้อีกนัยหนึ่งว่า ค่าความต้านทาน 1 เมกะโอห์ม ที่ปรับค่าได้ทำหน้าที่ปรับขนาดความสูงยอดพัลส์ของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด ให้มีขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งเราสามารถปรับให้กระแสอยู่ในช่วงใช้งานที่ปลอดภัยได้

ประการสุดท้าย คือ ขนาดความกว้างของพัลส์ของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดที่จุดครึ่งความสูงของพัลส์กระแสควรมีค่าไม่เกิน 200 นาโนวินาที ซึ่งค่านี้สามารถพิจารณาได้จากการเลือกค่าความจุที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ปลดปล่อยประจุผ่านเลเซอร์ไดโอด (C) กับค่า  $R_T$  ซึ่งเป็นค่าความต้านทานรวมของเอสซีอาร์ เลเซอร์ไดโอด และความต้านทาน 1 โอห์ม ซึ่งประกอบกันเป็นวงจร RC ดังนี้

$$i = \frac{V_C}{R_T} e^{-t/R_T C} \quad (63)$$

เมื่อ  $i =$  ขนาดของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด  
ที่เวลา  $t$  หลังจากตัวเก็บประจุเริ่มปล่อย  
กระแส

ที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0+$  จะได้

$$i_0 = \frac{V_C}{R_T}$$

ซึ่งก็คือค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดตามสมการ (62)

พิจารณาที่จุดครึ่งความสูงของกระแสสูงสุดจะได้ขนาดของกระแสที่จุดครึ่งความสูงของพัลส์เป็นครึ่งหนึ่งของกระแสสูงสุด ( $V_C/2R_T$ ) ดังนั้น จากสมการ (63) เราสามารถหาเวลาที่กระแสลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของกระแสที่จุดเริ่มต้น ( $t$ ) ได้ดังนี้

$$t = R_T C \ln 2 \quad (64)$$

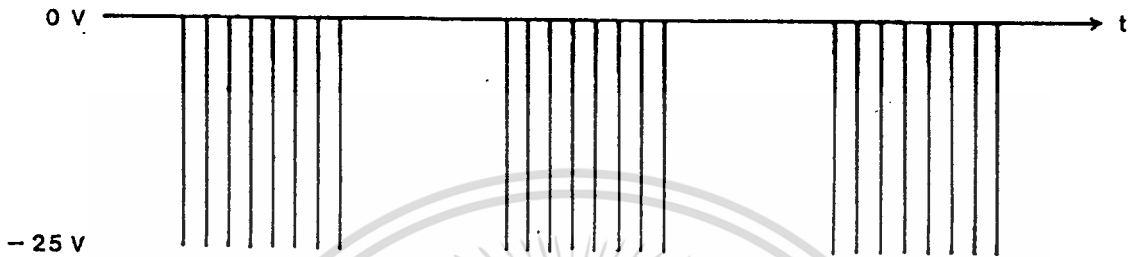
จากสมการ (64) ถ้าให้  $t = 200$  นาโนวินาที  
 $R_T = 10$  โอห์ม  
 จะได้  $C = .029$  ไมโครฟารัด

นั่นคือ ในวงจรรูปที่ 46 ถ้า  $R_T = 10$  โอห์ม การเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุ .022 ไมโครฟารัด หรือน้อยกว่า ทำหน้าที่ปลดปล่อยกระแสผ่านเลเซอร์ไดโอด จะทำให้ความกว้างที่จุดครึ่งความสูงของพัลส์กระแสมีค่าต่ำกว่า 200 นาโนวินาที

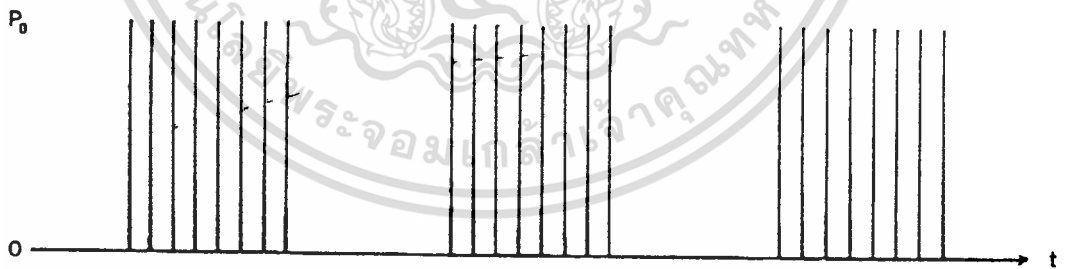
ในการทดลองนี้ เมื่อปล่อยให้ ไอซีเบอร์ 555 สร้างสัญญาณเปิด-ปิด เพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังให้กับรีแลคเซชันออสซิลเลเตอร์แล้ว จะได้สัญญาณที่เป็นกลุ่มของพัลส์ที่มีคุณสมบัติดัง ได้กล่าวผ่านมาแล้ว ออกทางด้านเบส 1 ของยูเจที และต่อให้กลุ่มพัลส์เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวจุดชนวนให้กับเกทของเอสซีอาร์ ซึ่งเอสซีอาร์นี้จะนำกระแสให้ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดในลักษณะคล้ายกับกลุ่มพัลส์ที่เป็นตัวจุดชนวน ใช้ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) วัดค่าความต่างศักย์คร่อมความต้านทาน 1 โอห์ม จะได้ลักษณะของกลุ่มพัลส์เป็นแบบพัลส์ทางด้านลบ (negative pulses) ดังแสดงในรูปที่ 49 ปรับค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ 1 เมกะโอห์ม ให้ได้ระดับค่าความต่างศักย์ที่ยอดสูงสุดของพัลส์ที่ตกคร่อมความต้านทาน 1 โอห์ม มีค่าเท่ากับ 25 โวลต์ และจะใช้ค่านี้ไปตลอดการทดลอง จากการทดลองได้

ยอดพัลส์สูงสุดของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด	= 25 แอมแปร์
ความกว้างของพัลส์กระแสที่จุดครึ่งความสูง	= $1.7 \times 10^{-7}$ วินาที
ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมา	= $9.04 \times 10^{-7}$ เมตร
ช่วงห่างระหว่างพัลส์	= $7.4 \times 10^{-4}$ วินาที
ช่วงกว้างของกลุ่มพัลส์	= $5.2 \times 10^{-3}$ วินาที
ช่วงห่างระหว่างกลุ่มพัลส์	= $5.4 \times 10^{-3}$ วินาที

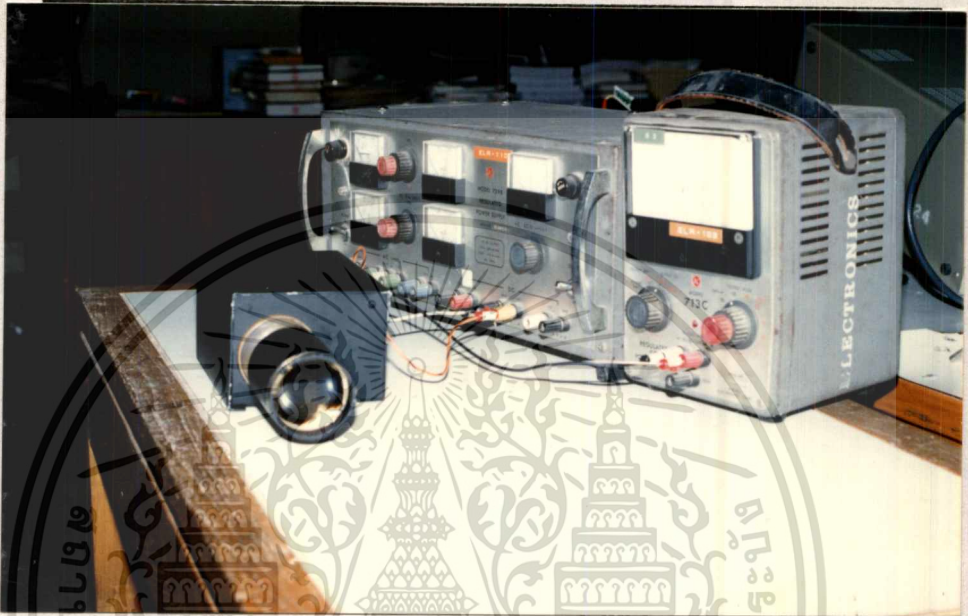
การปลดปล่อยแสงเลเซอร์ของเลเซอร์ไดโอดที่ใช้ในการทดลองนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 50 เนื่องจากแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยโดยเลเซอร์ไดโอดมีลักษณะบานออกคล้ายรูปพัด จึงต้องใช้เลนส์นูนช่วยในการรวมแสงให้ลำแสงของเลเซอร์พุ่งออกไปเป็นลำแสงขนานดัง ได้กล่าวผ่านมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1 และในรูปที่ 10 อุปกรณ์ที่เข้าด้วยแสงเลเซอร์ที่ได้สร้างขึ้นตามวิธีที่ได้กล่าวผ่านมาแล้วนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 51 และจะนำอุปกรณ์นี้ไปใช้ควบคู่กับระบบติดตามเป้าหมายเพื่อทดสอบการทำงานของระบบต่อไป



รูปที่ 49. ลักษณะของสัญญาณพัลส์ เมื่อวัดक्रमความต้านทาน 1 โอห์ม  
ที่ทำหน้าที่เป็นมอไนเตอร์ของกระแส



รูปที่ 50. ลักษณะของสัญญาณพัลส์ของแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกจาก  
เลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 51. ชุดอุปกรณ์ซึ่งเป่าหมายด้วยแสงเลเซอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทดสอบการทำงาน  
ของระบบติดตามเป่าหมายด้วยเลเซอร์

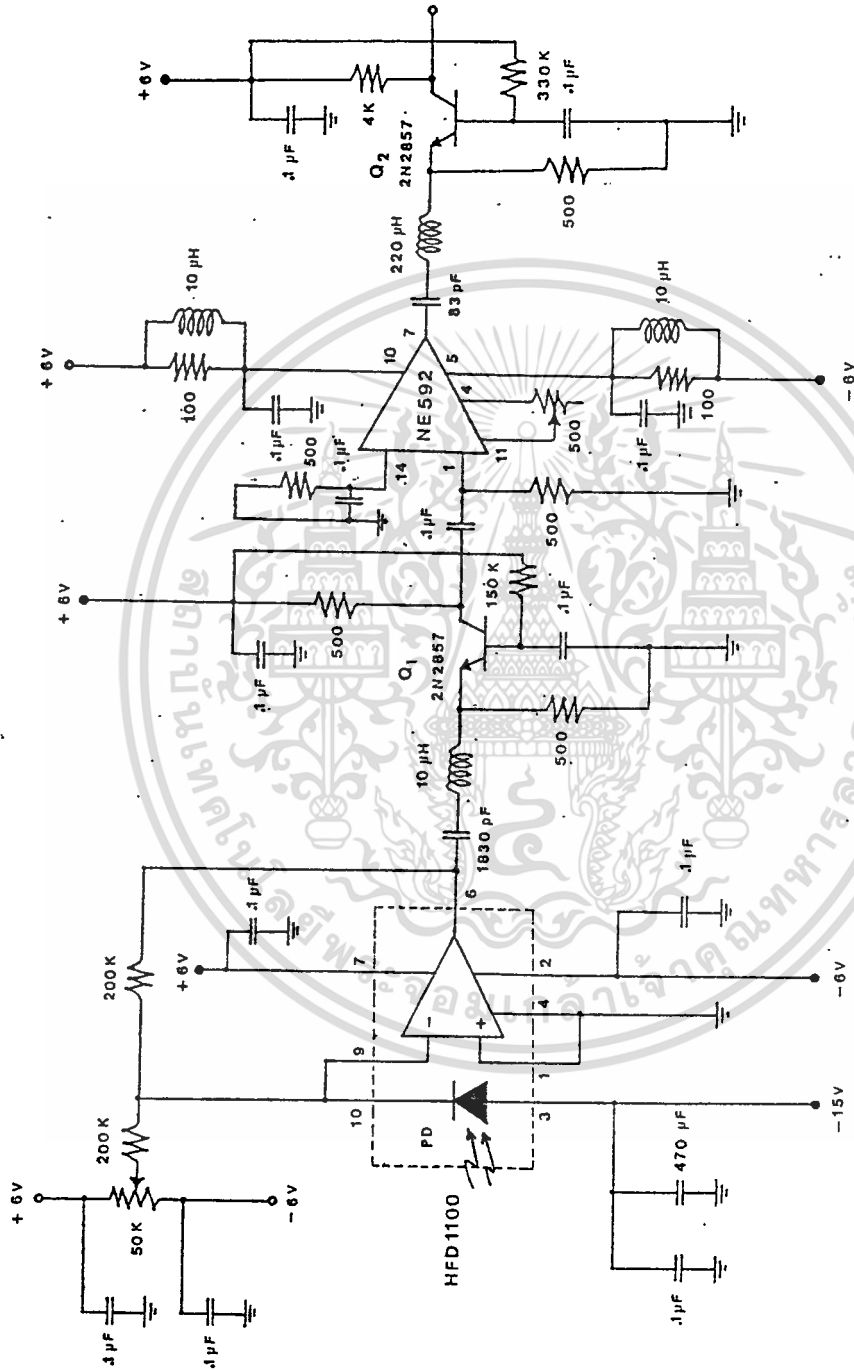
### 3.2 ระบบติดตามเป้าหมาย

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงระบบติดตามเป้าหมายอย่างละเอียดมาแล้ว ระบบนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ภาคใหญ่ ๆ คือ ภาครับและขยายสัญญาณ ภาคถอดรหัสสัญญาณ และภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ การทำงานของระบบนี้จะเริ่มจากเมื่อโฟโตไดโอด ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกมาจากเป้าหมายได้ สัญญาณแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วนำสัญญาณนี้ไปขยายและกรองสัญญาณรบกวนออก สัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะถูกนำไปถอดรหัส เพื่อให้ทราบว่า เป็นสัญญาณที่เกิดจากการชี้เป้าด้วยอุปกรณ์ชี้เป้าด้วยเลเซอร์ของฝ่ายเดียวกันหรือไม่ โฟโตไดโอดตัวใดเป็นตัวที่รับสัญญาณแสงเลเซอร์นั้นได้ ซึ่งจะทำให้ทราบว่าจุดที่แสงเลเซอร์สะท้อนออกมาจากเป้าหมายนั้นอยู่ทางทิศใดของระบบนี้ สัญญาณที่ผ่านการถอดรหัสจะถูกส่งไปยังภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ เพื่อควบคุมให้ระบบนี้หันเข้าสู่เป้าหมายที่ถูกชี้เป้าต่อไป

#### 3.2.1 ภาครับและขยายสัญญาณ

วงจรภาครับและขยายสัญญาณที่ใช้ในการทดลองนี้ดังแสดงในรูปที่ 52 โฟโตไดโอดที่ทำหน้าที่รับสัญญาณแสงเลเซอร์และวงจรปรีแอมป์ (preamplifier) ซึ่งอยู่ในรูปของไอซีบรรจุไว้ในตัวถังเดียวกัน เบอร์ HFD 1100 ของบริษัท EG&G Photon Devices [17] (ดูข้อมูลรายละเอียดใน ผผนวก ก) เนื่องจากพื้นที่รับสัญญาณแสงของโฟโตไดโอดมีขนาดเล็กมาก จึงใช้เลนส์นูนช่วยในการรวมสัญญาณแสงไปยังโฟโตไดโอด ทำให้โฟโตไดโอดมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณแสงได้ดีขึ้น เลนส์นูนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. มีความยาวโฟกัส 2.5 ซม. โดยติดตั้งให้เลนส์นูนอยู่ห่างจากโฟโตไดโอด 2.5 ซม. รายละเอียดได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อ 2.3.1 ลักษณะการติดตั้งเลนส์นูนและโฟโตไดโอดดังแสดงในรูปที่ 18 เลนส์นูนนี้จะช่วยรวมสัญญาณแสงให้มีความเข้มสูงขึ้นแล้วไปตกกระทบบนโฟโตไดโอด จึงเป็นการช่วยขยายสัญญาณแสงอีกวิธีหนึ่ง โฟโตไดโอด (PD) จะถูกต่อเข้ากับออปแอมป์และมีความต้านทานภายนอกขนาด 200 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ เมื่อสัญญาณแสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตไดโอด สัญญาณแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณกระแส  $i_p$  ที่มีลักษณะสอดคล้องกัน สัญญาณกระแส  $i_p$  จะถูกส่งเข้าไปขยายในออปแอมป์ และให้สัญญาณออกมาทางด้านเอาต์พุต ขาที่ 6 ในรูปของความต่างศักย์  $v_o$  การต่อวงจรในลักษณะนี้เป็นการต่อวงจรขยายแบบทรานส์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกับวงจรในรูปที่ 19(ก) โดยโฟโตไดโอดถูกไบแอสกลับด้านด้วยความต่างศักย์  $-15$  โวลต์ จากสมการที่ (11) เราได้

$$R_f = 200000 \quad \text{โอห์ม}$$



รูปที่ 52. วงจรภาครับและขยายสัญญาณ

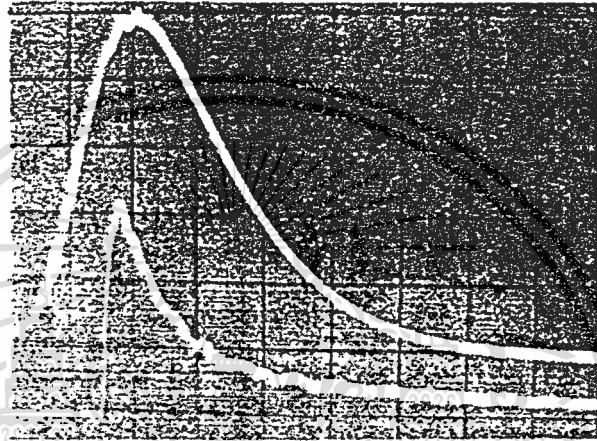
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ } V_O = -200000i_p \quad (65)$$

ส่วนความต้านทาน 50 กิโลโอห์มและ 200 กิโลโอห์ม อีกตัวจะทำหน้าที่เป็นวงจรรออฟ-เซต (offset) ให้กับออปแอมป์ การออฟเซตความต่างศักย์ทางด้านเอาต์พุทของออปแอมป์นี้ทำได้โดยใช้วัสดุทึบแสงปิดหน้าโฟโตไดโอดไม่ให้ได้รับแสงจากภายนอก แล้วใช้ออสซิลโลสโคป วัดความต่างศักย์ที่เอาต์พุทของออปแอมป์ ขาที่ 6 (วัดในขณะที่ยังไม่เชื่อมต่อเอาต์พุทนี้ไปยังภาคอื่น ๆ) ปรับความต้านทาน 50 กิโลโอห์ม ที่ปรับค่าได้ซึ่งต่ออยู่ภายนอกไอซีให้ได้ความต่างศักย์ทางด้านเอาต์พุทเทียบกับกราวด์มีค่าเป็นศูนย์ และก่อนที่จะนำวงจรนี้ไปต่อเข้ากับภาคอื่น ๆ จะใช้วงจรมีลักษณะของพัลส์ของแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยจากอุปกรณ์ซีเปียหมายด้วยเลเซอร์ที่สร้างขึ้น เพื่อนำข้อมูลไปออกแบบวงจรกรองสัญญาณและขยายสัญญาณที่อยู่ถัดจากวงจรปริแอมป์ต่อไป การศึกษาลักษณะพัลส์ของแสงเลเซอร์นี้กระทำได้โดย เปิดให้ชุดอุปกรณ์ซีเปียทำงานแล้วหันทางด้านที่ปลดปล่อยแสงเลเซอร์ออกไปที่เป้าหมาย ซึ่งอาจจะ เป็นฝาผนังห้องที่อยู่ใกล้กับอุปกรณ์นี้ก็ได้ นำวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยโฟโตไดโอดและปริแอมป์ (ออปแอมป์) ที่ได้รับการออฟเซตแล้วนี้ไปรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าที่ระยะไม่ห่างเป้ามามากนักให้ได้ระดับสัญญาณทางด้านเอาต์พุทของปริแอมป์สูงพอที่จะใช้วิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณได้ สาเหตุที่ไม่ใช้โฟโตไดโอดรับสัญญาณแสงเลเซอร์โดยตรงจากอุปกรณ์ซีเปีย เพราะแสงเลเซอร์มีพลังงานสูงและ โฟโตไดโอดและปริแอมป์มีความไวสูง จะทำให้ลักษณะของสัญญาณที่รับได้ถูกขลิบด้านบนออกเนื่องจากการอ้อมตัวของวงจรปริแอมป์ ลักษณะของสัญญาณที่ได้จะเป็นกลุ่มของพัลส์ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์ ความกว้างของกลุ่มพัลส์และระยะห่างระหว่างกลุ่มพัลส์ เช่นเดียวกับพัลส์ของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 49 และรูปที่ 50 ส่วนที่มีความแตกต่างกันคือลักษณะรูปร่างของพัลส์เดี่ยวของพัลส์กระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดกับพัลส์ของแสงเลเซอร์ที่รับได้จะแตกต่างกัน พัลส์ของกระแสจะมีลักษณะสูงชันและแคบทั้งขาขึ้นและขาลงของพัลส์ แต่พัลส์ของแสงที่โฟโตไดโอดรับได้จะมีความกว้างของพัลส์มากกว่า ในช่วงขาขึ้นของพัลส์ในตอนต้น ๆ ความชันของสัญญาณจะมีน้อยและจะชันขึ้นมากในตอนถัดไป ทั้งนี้เพราะในตอนต้น ๆ กระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดยังไม่ถึงระดับกระแสขีดเริ่มของการเกิดเลเซอร์ ในกรณีนี้เลเซอร์ไดโอดจะประพฤติตัวเป็นไดโอดเปล่งแสงธรรมดา (LED) การตอบสนองต่อกระแสจะไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำให้ความชันของพัลส์ในช่วงนี้มีความชันน้อย เมื่อกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอดมีขนาดสูงกว่าหรือเท่ากับกระแสขีดเริ่มในการเกิดเลเซอร์ แสงที่ปลดปล่อยออกจากเลเซอร์ไดโอดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (dramatically) และค่อนข้างจะเป็นเชิง

เส้น [6],[7] จึงทำให้ความชันของพัลส์ของแสงเพิ่มสูงขึ้นในตอนนี้ ในช่วงขาลงของพัลส์ของแสงจะมีความชันน้อยกว่าในตอนขาขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คือช่วงเวลาของพัลส์ในตอนขาลงจะมากกว่าช่วงเวลาของพัลส์ขาขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดสะสมในรอยต่อ PN ของเลเซอร์ไดโอดมีมาก และมีผลทำให้ปริมาณแสงที่ออกมาในช่วงต่อมาถูกลดทอนลง และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ตัวอย่างลักษณะการเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมากับลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด [6] ดังแสดงในรูปที่ 53

เนื่องจากลักษณะของสัญญาณแสงเลเซอร์ที่รับได้เป็นแบบพัลส์มีความชันทางด้านขาขึ้นมากกว่าด้านขาลง จะเห็นได้ว่าสัญญาณแบบพัลส์นี้ประกอบไปด้วยความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) อยู่มากมายหลายความถี่ ถ้าจะคงลักษณะของสัญญาณพัลส์แบบนี้ไว้หลังจากผ่านวงจรภาคขยายแล้ว จะต้องใช้วงจรขยายที่มีแถบการขยายความถี่กว้าง ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสีย คือ ระบบจะถูกรบกวนจากภายนอกได้ง่าย สัญญาณรบกวนที่เกิดทั้งจากภายนอกและภายในวงจรถ้าอยู่ในย่านของความถี่ของการขยายจะได้รับการขยายด้วย จึงทำให้มีสัญญาณรบกวนปนกับสัญญาณจริงออกมาค่อนข้างสูง ในความเป็นจริงแล้วไม่มีความจำเป็นที่จะต้องรักษารูปแบบของสัญญาณพัลส์นี้ ให้คงเดิมไว้ เพราะสิ่งที่เราจะนำไปใช้งานต่อไปก็คือ ขนาดความสูงของพัลส์ ช่วงห่างระหว่างพัลส์ ช่วงความกว้างของกลุ่มพัลส์ และช่วงห่างระหว่างกลุ่มของพัลส์ ขนาดความสูงของพัลส์ที่ผ่านการขยายออกมาแล้วและพร้อมที่จะนำไปใช้งานต้องได้รับการขยายให้มีขนาดสูงขึ้นอย่างเพียงพอ มีสัญญาณรบกวนน้อย และพัลส์ที่ได้รับการขยายแล้วนี้ ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะรูปร่างเหมือนพัลส์เดิมก่อนการขยาย เพราะก่อนนำสัญญาณพัลส์เหล่านี้ไปผ่านวงจรถอดรหัส พัลส์เหล่านี้จะได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นแบบอื่นอยู่แล้ว สิ่งที่สำคัญคือ ช่วงห่างระหว่างพัลส์ ช่วงความกว้างของกลุ่มพัลส์ และช่วงห่างระหว่างกลุ่มของพัลส์เมื่อก่อนและหลังการขยายสัญญาณต้องมีค่าเท่ากัน วงจรขยายสัญญาณที่นำมาใช้ในกรณีนี้จึงเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบผ่านแถบ โดยจะใช้วงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบกรองสัญญาณทั้งก่อนและหลังการขยายสัญญาณแล้ว ดังได้กล่าวแล้วว่าสัญญาณพัลส์ของแสงที่ออกจากเอาต์พุตของปริ๊อมป์ ประกอบด้วยความถี่มูลฐานมากมายหลายความถี่ และยังมีสัญญาณรบกวนทั้งจากภายนอกและภายในวงจรในบางความถี่อีกด้วย จึงจำเป็นต้องเลือกความถี่มูลฐานช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งที่เป็นองค์ประกอบของพัลส์ออกมาขยายใช้งานต่อไป และกรองเอาความถี่และสัญญาณรบกวนนอกช่วงความถี่ที่จะทำการขยายนี้ออกไป การเลือกเอาความถี่ที่จะนำไปขยายและใช้งานนี้ พิจารณาจากความถี่ที่มีความสูงเด่นที่ประกอบอยู่ในสัญญาณพัลส์ ในการทดลองนี้ใช้วิธีเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณพัลส์



รูปที่ 53. ลักษณะของกระแสดiode ที่ไหลผ่านเลนเซอร์ไดโอด (บน)  
กับลักษณะของแสงเลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมา (ล่าง) [6]

กับความถี่คลื่นไซน์ (sine wave) มาตรฐานจากเครื่องกำเนิดสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคปสองช่องสัญญาณในการเปรียบเทียบ โดยให้สัญญาณพัลส์ผ่านเข้าไปที่ช่องสัญญาณหนึ่งและให้ความถี่คลื่นไซน์มาตรฐานผ่านเข้าไปอีกช่องสัญญาณหนึ่ง เนื่องจากสัญญาณพัลส์ที่วัดได้จากทางด้านเอาต์พุทของปริแอมป์เป็นแบบพัลส์ทางด้านบวก ดังนั้นต้องปรับให้ ความสูงของคลื่นไซน์ทางด้านบวกสูงเท่ากับ ความสูงของพัลส์ เปรียบเทียบลักษณะสัญญาณของพัลส์ในช่วงขาขึ้นจากฐานจนถึงยอดโค้งของพัลส์กับคลื่นไซน์มาตรฐาน โดยการปรับค่าความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณให้ได้ลักษณะสัญญาณดังกล่าวใกล้เคียงกันที่สุด ค่าความถี่ที่ได้นี้ถือได้ว่าเป็นค่าความถี่ที่แฝงอยู่ในสัญญาณพัลส์ และจะกรองเอาเฉพาะความถี่ในย่านนี้ไปทำการขยายและนำไปใช้งานต่อไป จากการทดลองเราได้ค่าความถี่นี้มีค่าเท่ากับ  $1.176 \text{ MHz}$  พัลส์ของแสงที่วัดได้นี้มีความกว้างที่จุดครึ่งความสูงของพัลส์เท่ากับ  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที แต่ถ้าวาดเส้นตรงจากจุดยอดสูงสุดของพัลส์ลงมาตั้งฉากกับแกนเวลาแล้ว ณ จุดครึ่งความสูงของพัลส์ ช่วงกว้างระหว่างแนวเส้นตรงดังกล่าวกับขอบสัญญาณที่ระดับเดียวกันในตอนขาขึ้นของสัญญาณพัลส์ มีค่าเท่ากับ  $1.5 \times 10^{-7}$  วินาที และช่วงกว้างดังกล่าวที่ระดับเดียวกันในตอนขาลงของสัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ  $2.5 \times 10^{-7}$  วินาที

จากรูปที่ 52 ในวงจรขยายสัญญาณจะนำวงจรกรองสัญญาณแบบผ่านแถบมาใช้ 2 แห่ง คือ แห่งแรกเป็นการกรองสัญญาณหลังจากสัญญาณผ่านออกจากปริแอมป์และจะเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณ โดยการใช้วงจรอนุกรม RLC จากการทดลอง ใช้ค่า  $L=10$  ไมโครเฮนรี และ  $C = 1830$  พิโคฟารัด ซึ่งค่า  $C = 1830$  พิโคฟารัดนี้ ในทางปฏิบัติใช้  $C = 1500$  พิโคฟารัดต่อขนานกับค่า  $C = 330$  พิโคฟารัด จากสมการ (14) และ  $\omega = 2\pi f$  จะได้ความถี่ที่จุดกึ่งกลางของแถบความถี่ที่ผ่านการกรองไปได้ ( $f_0$ ) เท่ากับ  $1.1765 \text{ MHz}$  ส่วนวงจรกรองสัญญาณแบบผ่านแถบแห่งที่ 2 จะทำหน้าที่กรองสัญญาณหลังจากที่สัญญาณได้รับการขยายและผ่านวงจรขยายสัญญาณออกมาแล้ว โดยใช้วงจรอนุกรม RLC เช่นเดียวกัน จากการทดลอง ใช้ค่า  $L = 220$  ไมโครเฮนรี และ  $C = 83$  พิโคฟารัด และจากสมการ (14) จะได้ความถี่ที่จุดกึ่งกลางของแถบความถี่ที่ผ่านการกรองไปได้ ( $f_0$ ) เท่ากับ  $1.1778 \text{ MHz}$

วงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม  $Q_1$  ใช้ ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N2857 ใช้เป็นวงจรเชื่อมโยงระหว่าง ปริแอมป์ กับวงจรขยาย ทั้งนี้เพราะเอาต์พุทของวงจรปริแอมป์มีความต้านทาน 10 โอห์ม แต่อินพุทของวงจรขยายสัญญาณมีความต้านทานประมาณ 500 โอห์ม ซึ่งแตกต่างกันมาก จากรูปที่ 23(ก) และจากวงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วมของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  ในรูปที่ 52 เราจะได้

$$\begin{aligned} R_L &= 500 \text{ โอห์ม} \\ R_B &= 150 \text{ กิโลโอห์ม} \\ R_E &= 500 \text{ โอห์ม} \end{aligned}$$

จากคู่มือทรานซิสเตอร์ สำหรับทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N2857 จะได้ค่า  $h_{FE} = 90$  และ  $h_{fe} = 135$  จากสมการ (30) สมการ (38) และสมการ (39) สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบเบสรวมนี่ จะได้

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟตรงที่ไหลผ่านเบส (} I_B \text{)} &= 27.6 \text{ ไมโครแอมแปร์} \\ \text{ความต้านทานทางด้านอินพุต (} R_{in} \text{)} &= 10 \text{ โอห์ม} \\ \text{ความต้านทานทางด้านเอาต์พุต (} R_O \text{)} &= 500 \text{ โอห์ม} \\ \text{อัตราขยายความต่างศักย์ (} A_V \text{)} &= 48.3 \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันนี้สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบเบสรวมนของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  จะได้

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟตรงที่ไหลผ่านเบส (} I_B \text{)} &= 14.38 \text{ ไมโครแอมแปร์} \\ \text{ความต้านทานทางด้านอินพุต (} R_{in} \text{)} &= 19.1 \text{ โอห์ม} \\ \text{ความต้านทานทางด้านเอาต์พุต (} R_O \text{)} &= 4 \text{ กิโลโอห์ม} \\ \text{อัตราขยายความต่างศักย์ (} A_V \text{)} &= 201.3 \end{aligned}$$

พิจารณาวงจรกรองสัญญาณแบบผ่านแถบ RLC ในรูปที่ 20 เปรียบเทียบกับวงจรกรองสัญญาณแบบผ่านแถบที่ใช้ในการทดลอง ในรูปที่ 52 ทั้งสองแห่งคือก่อนและหลังการขยายสัญญาณ ในกรณีของวงจรกรองสัญญาณแบบผ่านแถบบ่อนการขยายสัญญาณจะได้

$$\begin{aligned} L &= 10 \text{ ไมโครเฮนรี} \\ C &= 1830 \text{ พิโคฟารัด} \\ R &= \text{ความต้านทานทางด้านอินพุตของวงจรขยายสัญญาณแบบเบส} \\ &\quad \text{รวมนของทรานซิสเตอร์ } Q_1 \\ &= 10 \text{ โอห์ม} \\ f_0 &= 1.176 \text{ เมกะเฮิรตซ์} \end{aligned}$$

จากสมการ (22) และสมการ (25) และ  $\omega = 2\pi f$  จะหา  $f_1$  และ  $f_2$  ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} f_1 &= 1.099 \text{ เมกะเฮิรตซ์} \\ f_2 &= 1.258 \text{ เมกะเฮิรตซ์} \end{aligned}$$

โดย  $f_1$  คือความถี่ที่จุดครึ่งกำลังทางด้านความถี่ต่ำ

$f_2$  คือความถี่ที่จุดครึ่งกำลังทางด้านความถี่สูง

นั่นคือวงจรรองสัญญาณแบบผ่านแถบในกรณีนี้มีความกว้างของแถบสัญญาณที่ยอมให้ผ่านอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 1.099 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1.258 เมกะเฮิรตซ์ โดยยอมให้สัญญาณที่ความถี่ 1.176 เมกะเฮิรตซ์ มีอัตราการผ่านได้สูงสุด และสัญญาณความถี่อื่น ๆ นอกแถบดังกล่าวจะถูกบั่นทอนสูงมากกว่า 3dB เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ความถี่ 1.176 เมกะเฮิรตซ์

ในทำนองเดียวกัน จากวงจรรองสัญญาณแบบผ่านแถบชุดที่สองที่ต่ออยู่ด้านหลังวงจรรขยายสัญญาณจะได้

$$\begin{aligned} L &= 220 && \text{ไมโครเฮนรี} \\ C &= 83 && \text{พิโคฟารัด} \\ R &= 19.1 && \text{โอห์ม} \\ f_0 &= 1.178 && \text{เมกะเฮิรตซ์} \\ f_1 &= 1.171 && \text{เมกะเฮิรตซ์} \\ f_2 &= 1.185 && \text{เมกะเฮิรตซ์} \end{aligned}$$

นั่นคือ วงจรรองสัญญาณแบบผ่านแถบชุดหลังนี้ มีความกว้างของแถบสัญญาณที่ยอมให้ผ่านได้อยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 1.171 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1.185 เมกะเฮิรตซ์

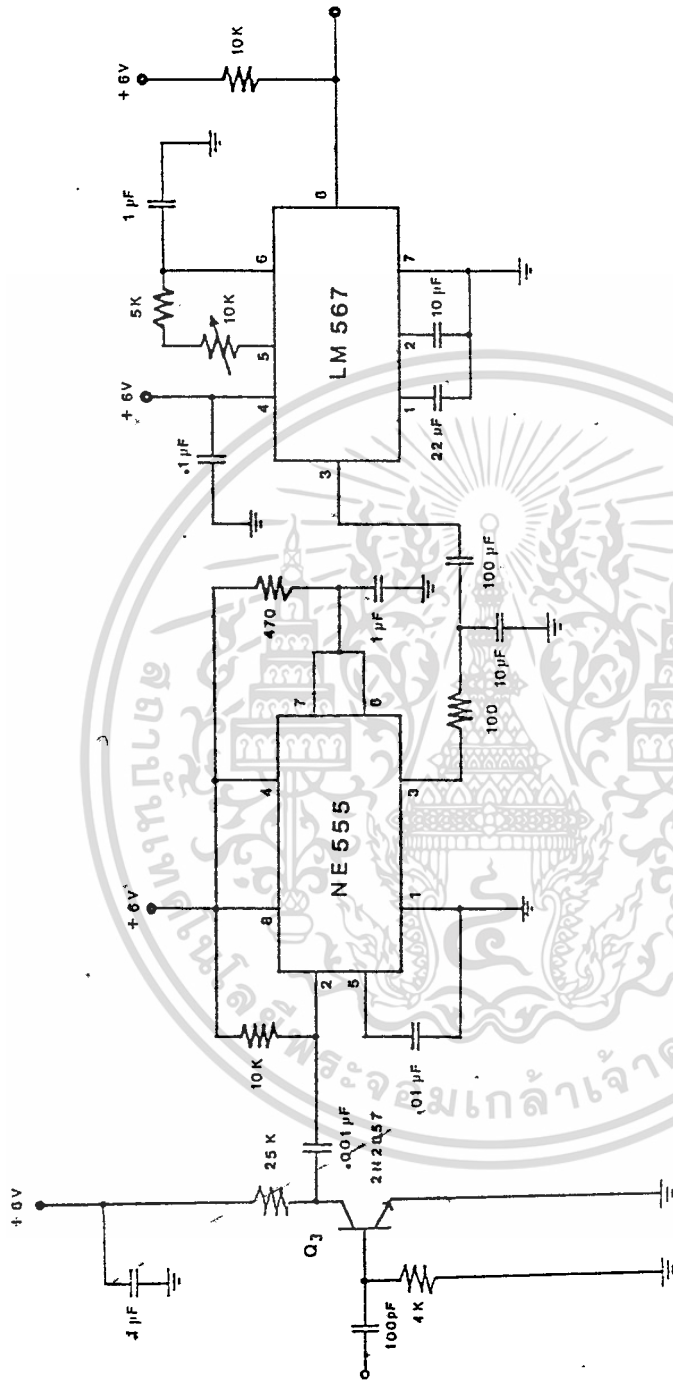
พิจารณาวงจรรขยายสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นวงจรรชนิดขยายสัญญาณความแตกต่าง โดยใช้ไอซีเบอร์ NE592 Differential Video Amp. [ผนวก ข] และได้กล่าวถึงรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 2.3.5 แหล่งจ่ายกำลังทางด้านบวกจะต่อเข้าทางด้านขา 10 แหล่งจ่ายกำลังทางด้านลบจะถูกต่อเข้าที่ขา 5 ของไอซี โดยมีอินตักแคนซ์ ค่า 10 ไมโครเฮนรี ความต้านทาน 100 โอห์ม และตัวเก็บประจุ .1 ไมโครฟารัด ทำหน้าที่กรองกระแสและความต่างศักย์ที่ต่อเข้าทางด้านขา 5 และขา 10 ของไอซีดังกล่าวให้มีความราบเรียบ ที่อินพุทขา 1 จะถูกต่อไบแอสด้วยความต้านทาน 500 โอห์ม ระหว่างขา 1 และกราวด์ สัญญาณที่ผ่านออกจากวงจรรขยายสัญญาณแบบเบสร่วมทางด้านคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะถูกต่อผ่านตัวเก็บประจุ .1 ไมโครฟารัด เข้าไปในวงจรรขยายสัญญาณทางด้านขา 1 ของไอซีนี้ ส่วนทางด้านอินพุทขา 14 จะถูกต่อไบแอสด้วยความต้านทาน 500 โอห์ม ลงกราวด์เช่นเดียวกับที่ขา 1 แต่ที่ขา 14 นี้จะถูกต่อผ่านลงกราวด์ (bypass) โดยตัวเก็บประจุค่า .1 ไมโครฟารัด เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนผ่านเข้าทางขา 14 ดังนั้น สัญญาณผลต่างระหว่างความต่างศักย์ทางด้านอินพุทจะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างขา 1 กับกราวด์ สัญญาณทางด้านเอาต์พุทของวงจรรขยายสัญญาณจะถูกต่อออกไปใช้งานผ่านทางขา

7 เพียงปลายเดียว (single-ended output) ลักษณะของสัญญาณที่ผ่านออกมาจะมีเฟสเดียวกันกับสัญญาณที่ผ่านเข้าทางขา 1 อัตราการขยายสัญญาณความต่างศักย์ของวงจรนี้ ขึ้นกับค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ ซึ่งต่ออยู่ระหว่างขา 4 กับขา 11 จากกราฟรูปที่ 26 และรูปที่ 27 จะได้อัตราการขยายสูงสุดที่ปลายเอาต์พุตทางด้านเดียวที่ขา 7 มีค่าเท่ากับ 200 เท่า หรือ 46 เดซิเบล จากตารางคุณลักษณะของไอซีเบอร์นี้ ในกรณีต่อวงจรขยายสัญญาณในลักษณะนี้ (Gain 1) จะได้ความต้านทานทางด้านอินพุตประมาณ 4 กิโลโอห์ม ซึ่งต่อขนานกับความต้านทาน 500 โอห์มที่ต่อไบแอสอยู่ ดังนั้นความต้านทานรวมที่ได้ทางด้านอินพุตจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า 500 โอห์ม และจากตารางนี้จะได้อัตราการขยายของภาคขยายสัญญาณให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการ โดยอาศัยการปรับค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ที่ต่อคร่อมอยู่ระหว่างขา 4 กับขา 11 ของไอซีเบอร์ NE592 ส่วนวิธีการปรับค่าอัตราการขยายนั้นจะได้กล่าวในตอนต่อไป

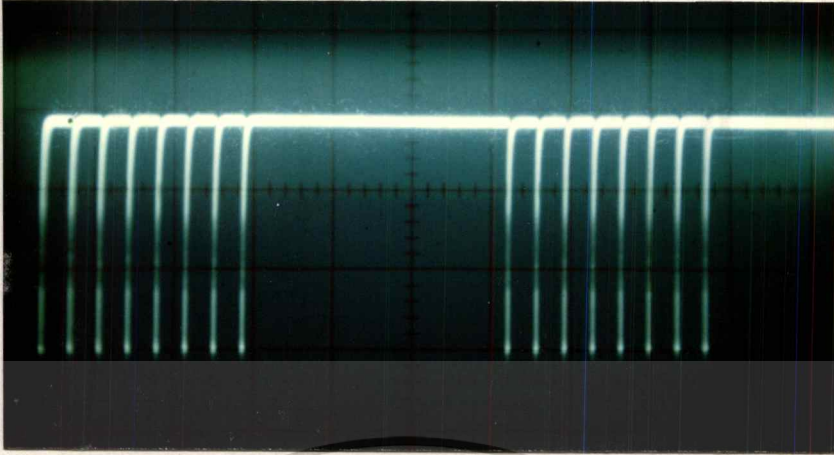
สรุปแล้วในภาครับและขยายสัญญาณนี้ โฟโตไดโอดจะทำหน้าที่รับสัญญาณแสงเปลี่ยนเป็นสัญญาณกระแส สัญญาณกระแสจะถูกขยายโดยปรีแอมป์ ด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบทรานซิสมิกพีแอนด์เอ็นได้สัญญาณในรูปของความต่างศักย์ สัญญาณนี้จะถูกกรองด้วยวงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบ RLC แล้วถูกขยายความต่างศักย์ โดยวงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม สัญญาณที่ได้จะถูกนำไปขยายความต่างศักย์ และกระแสโดยวงจรขยายสัญญาณคิเพอเรนเซียลวิตีโอทีปรับอัตราการขยายได้ สัญญาณจะถูกกรองผ่านวงจรกรองความถี่แบบผ่านแถบ RLC อีกครั้งหนึ่ง แล้วถูกขยายความต่างศักย์ผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบเบสร่วม สัญญาณที่ออกจากภาคนี้ พร้อมจะนำไปใช้งานในภาคถอดรหัสสัญญาณที่อยู่ถัดไป

### 3.2.2 ภาคถอดรหัสสัญญาณ

วงจรภาคถอดรหัสสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 54 ประกอบไปด้วย วงจรขลิบสัญญาณและกลับเฟสโดยใช้ทรานซิสเตอร์  $Q_3$  วงจรขยายความกว้างของพัลส์โดยใช้ไอซีเบอร์ NE555 วงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านและวงจรถอดรหัสช่วงความถี่โดยใช้ไอซีเบอร์ LM567 ในสภาวะปกติที่ยังไม่มีสัญญาณป้อนเข้าทางด้านเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_3$  ทรานซิสเตอร์นี้จะอยู่ในสภาวะคัทออฟ และศักย์ไฟฟ้าที่คอลเลคเตอร์จะมีค่าประมาณ 6 โวลต์ เท่ากับ  $V_{CC}$  เพราะในขณะนี้เบสของทรานซิสเตอร์ถูกไบแอสแบบกลับด้านโดยใช้ความต้านทาน 4 กิโลโอห์ม ต่อระหว่างเบสกับกราวด์ เมื่อมีสัญญาณผ่านเข้ามาทางด้านเบสและมีขนาดของความต่างศักย์เมื่อเทียบกับกราวด์สูงกว่า 0.6 โวลต์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_3$  นี้อยู่ในสภาวะถูกไบแอสตรง



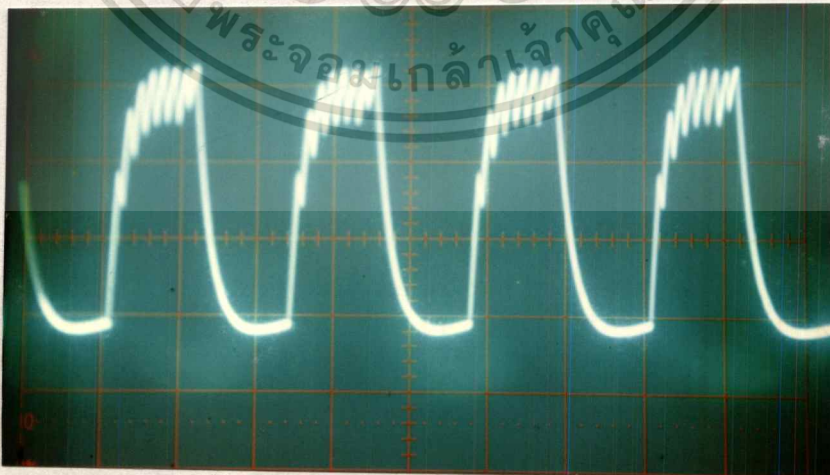
รูปที่ 54: วงจรภาคถอดรหัสสัญญาณ



รูปที่ 55. ลักษณะของสัญญาณเมื่อผ่านวงจรขลิบสัญญาณและกลับเฟส



รูปที่ 56. ลักษณะของกลุ่มพัลส์เมื่อผ่านออกจากวงจรขยายความกว้างของพัลส์



รูปที่ 57. ลักษณะของสัญญาณเมื่อผ่านออกจากวงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะมีกระแสไหลผ่านเข้าไปในเบสของทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะเป็นผลทำให้มีกระแสไหลผ่านคอลเลคเตอร์และความต้านทาน 25 กิโลโอห์ม เนื่องจากทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2857 มีอัตราขยายสัญญาณกระแส  $h_{fe}$  เท่ากับ 135 ดังนั้นถ้ากระแสที่ไหลผ่านเบสมีค่าเกิน 1.8 ไมโครแอมแปร์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์นี้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวและความต่างศักย์ที่คร่อมระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสเบสที่ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะคัทออฟและสภาวะอิ่มตัวมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ทรานซิสเตอร์นี้จึงทำหน้าที่เป็น สวิตช์ปิด - เปิด ให้กระแสไหลผ่านคอลเลคเตอร์ แต่ในขณะที่เดียวกันถ้าความต่างศักย์ของสัญญาณที่ป้อนเข้าทางด้านเบสมีค่าต่ำกว่า 0.6 โวลต์ ทรานซิสเตอร์นี้จะอยู่ในสภาวะคัทออฟ คอลเลคเตอร์จะไม่นำกระแสสัญญาณดังกล่าวจะไม่ถูกขยายออกจากคอลเลคเตอร์ นั่นคือ สัญญาณส่วนที่ต่ำกว่า 0.6 โวลต์ ที่ป้อนเข้าทางด้านเบสจะถูกขลิบออก เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณทางคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ในรูปที่ 52 มีลักษณะเป็นกลุ่มพัลส์ทางด้านบวก มีลักษณะเช่นเดียวกับพัลส์ของแสงเลเซอร์ ในรูปที่ 50 แต่จะมีสัญญาณรบกวนปนออกมามากมายยังไม่เหมาะสมที่จะนำสัญญาณไปถอดรหัสจึงต้องกำจัดสัญญาณรบกวนนี้ออกไปก่อน โดยการต่อสัญญาณนี้ผ่านตัวเก็บประจุค่า 100 พิโคฟาร์ด เข้าไปทางด้านเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_3$  เพื่อขลิบสัญญาณรบกวนออก ในการทดลองใช้วิธีปรับอัตราขยายโดยการปรับค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ที่คร่อมระหว่างขา 4 กับขา 11 ของไอซีเบอร์ NE592 ให้ได้สัญญาณรบกวน มีระดับต่ำกว่า 0.6 โวลต์ ก่อนป้อนเข้าที่เบสของทรานซิสเตอร์  $Q_3$  ในทางปฏิบัติจะใช้ออสซิลโลสโคปดูลักษณะสัญญาณที่ออกทางด้านคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์  $Q_3$  แล้วปรับค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ดังกล่าวจนได้สัญญาณที่พอดีไม่มีสัญญาณรบกวนหรือมีสัญญาณรบกวนในระดับต่ำมาก ลักษณะของสัญญาณที่ได้เมื่อผ่านวงจรขลิบและกลับเฟสสัญญาณนี้ จะมีลักษณะเป็นกลุ่มพัลส์ทางด้านลบดังแสดงในรูปที่ 55 ระยะห่างระหว่างพัลส์ ความกว้างของกลุ่มพัลส์ และระยะห่างระหว่างกลุ่มของพัลส์ มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณและพัลส์เหล่านี้จะถูกนำไปผ่านวงจรขยายความกว้างของพัลส์ เพื่อขยายความกว้างของพัลส์ต่อไป

พิจารณาวงจรขยายความกว้างของพัลส์ รูปที่ 30 เปรียบเทียบกับรูปที่ 54 ที่ใช้ในการทดลองจะได้

$$R_A = 470 \text{ โอห์ม}$$

$$C = 1 \text{ ไมโครฟาร์ด}$$

เมื่อสัญญาณในลักษณะของกลุ่มพัลส์ทางด้านลบถูกส่งออกจากวงจรขลิบและกลับเฟสสัญญาณผ่านตัวเก็บประจุค่า .001 ไมโครฟาร์ด เข้าไปยังขา 2 ของไอซีเบอร์ NE555 ใน

ขณะที่แต่ละพัลส์มีค่าความต่างศักย์ลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า  $V_{CC}/3$  หรือ 2 โวลต์ พัลส์เหล่านี้จะจุดชนวน (trig) ที่ขา 2 แล้วจะไต่กลุ่มของพัลส์ทางด้านบวกออกจากขา 3 และพัลส์แต่ละลูกจะถูกขยายความกว้าง ลักษณะของกลุ่มพัลส์ที่ออกมาทางด้านขา 3 ดังแสดงในรูปที่ 56 จากสมการ (44) จะได้ความกว้างของพัลส์แต่ละลูก  $t_{PW}$  ดังนี้

$$t_{PW} = 1.1R_A C = 5.17 \times 10^{-4} \text{ วินาที}$$

และจากการทดลองวัดได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

ความกว้างของพัลส์แต่ละลูก ( $t_{PW}$ )	=	$5.3 \times 10^{-4}$	วินาที
ความกว้างของกลุ่มพัลส์	=	$5.6 \times 10^{-3}$	วินาที
ช่วงห่างระหว่างกลุ่มพัลส์	=	$5.0 \times 10^{-3}$	วินาที
คาบเวลาจากพัลส์หนึ่งไปยังพัลส์ที่อยู่ถัดไป	=	$7.4 \times 10^{-4}$	วินาที
คาบเวลาของกลุ่มพัลส์	=	$10.6 \times 10^{-3}$	วินาที

นั่นคือจะได้

$$\text{ความถี่ของพัลส์} = 1351.35 \text{ เฮิรตซ์}$$

$$\text{ความถี่ของกลุ่มพัลส์} = 94.34 \text{ เฮิรตซ์}$$

กลุ่มของพัลส์เหล่านี้จะผ่านออกจากขา 3 ของไอซีเบอร์ 555 และถูกต่อผ่านเข้าไปในวงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านเพื่อกรองความถี่ของพัลส์ออกไปให้เหลือเฉพาะความถี่ของกลุ่มพัลส์แล้วนำความถี่ของกลุ่มพัลส์ไปถอดรหัสความถี่ต่อไป

พิจารณาวงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ในรูปที่ 31 เปรียบเทียบกับวงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ในรูปที่ 54 ซึ่งต่ออยู่ทางด้านเอาต์พุทของวงจรขยายความกว้างของพัลส์ ในกรณีนี้จะได้

$$R = 100 \text{ โอห์ม}$$

$$C = 10 \text{ ไมโครฟาร์ด}$$

และจากสมการ (45) จะได้

$$f_C = 159.15 \text{ เฮิรตซ์}$$

นั่นคือ วงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านในวงจรทดลองนี้ จะยอมให้ความถี่ 94.34 เฮิรตซ์ ผ่านโดยมีการบั่นทอนสัญญาณน้อย ในขณะที่เดียวกัน ความถี่ 1351.35 เฮิรตซ์จะถูกบั่นทอนลงไปมาก ลักษณะสัญญาณพัลส์ ในรูปที่ 56 เมื่อผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านนี้แล้วจะได้สัญญาณออกมาทางด้านเอาต์พุทมีลักษณะดังรูปที่ 57 จากการทดลองวัดความถี่ของสัญญาณนี้ได้เท่ากับ 94.34 เฮิรตซ์ ความสูงของสัญญาณจากยอดกลางถึงยอดบนประมาณ 3 โวลต์ สัญญาณนี้จะถูกส่งผ่านตัวเก็บประจุ 100 ไมโครฟาร์ด เข้าไปถอดรหัสความถี่ทางด้านขา 3 ของไอซีถอดรหัสช่วงความถี่เบอร์

LM567 การใช้งานขยายความกว้างของพัลส์ และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่กล่าวผ่านมาเพราะต้องการแยกความถี่ของพัลส์และสัญญาณรบกวนออกจากความถี่ของกลุ่มพัลส์ที่มีความถี่ต่ำกว่า และจะทำให้ได้ขนาดความสูงของสัญญาณความถี่กลุ่มพัลส์มีขนาดสูงพอก่อนผ่านเข้าสู่วงจรตรรกะความถี่ นอกจากการใช้วงจรดังกล่าวแล้ว เรายังสามารถใช้วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบรีทริกเกอร์เอเบิล (retriggerable monostable multivibrator) จากไอซีเบอร์ 74122 หรือ 74123 หรือใช้วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (active filter) ที่สามารถให้ค่า Q สูง ๆ มาทำหน้าที่แทนได้

พิจารณาวงจรตรรกะที่ช่วงความถี่ ในรูปที่ 33 เปรียบเทียบกับวงจรตรรกะที่ช่วงความถี่ ในรูปที่ 54 จากตารางคุณลักษณะเฉพาะของไอซี LM567 ได้ความต้านทานทางด้านอินพุตเท่ากับ 20 กิโลโอห์ม เมื่อมองเข้าไปทางด้านอินพุตแล้วจะพบว่ามีความถี่ที่จุดค่า 100 ไมโครฟารัดต่ออยู่กับความต้านทาน 20 กิโลโอห์ม ในลักษณะของวงจร RC กรองสัญญาณความถี่สูงผ่าน (RC-high pass filter) ซึ่งจะมีค่าความถี่คัทออฟ  $f_c$  เท่ากับ 0.08 เฮิรตซ์ นั่นคือ สัญญาณความถี่ 94.34 เฮิรตซ์ สามารถผ่านเข้าสู่วงจรตรรกะที่ช่วงความถี่ได้ โดยมีการบั่นทอนสัญญาณน้อยมาก จากการเปรียบเทียบวงจรจะได้

$$\begin{aligned} R_1 & \text{ มีค่าที่ปรับค่าได้อยู่ระหว่าง } 5 \text{ กิโลโอห์ม ถึง } 15 \text{ กิโลโอห์ม} \\ C_1 & = 1 \text{ ไมโครฟารัด} \\ C_2 & = 10 \text{ ไมโครฟารัด} \\ C_3 & = 22 \text{ ไมโครฟารัด} \end{aligned}$$

จากสมการ (48) จะได้ค่า  $f_0$  มีค่าที่สามารถปรับค่าได้อยู่ระหว่าง 60.60 เฮิรตซ์ ถึง 181.81 เฮิรตซ์ ในการทดลองนี้สัญญาณที่ต้องการตรรกะที่มีค่า  $f_0$  เท่ากับ 94.34 เฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงของ  $f_0$  ที่ปรับค่าได้ของวงจร ในกรณีนี้จะปรับค่า  $R_1$  ให้มีค่าประมาณ 9.6 กิโลโอห์ม จากสมการ (49) ในกรณีที่สัญญาณอินพุต  $V_i \leq 200 \text{ mVrms}$  และ  $f_0 = 94.34$  เฮิรตซ์ จะได้ความกว้างแถบในการตรวจจับควมถี่ (BW) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ  $f_0$  โดยประมาณ ดังนี้

$$BW = 34.83 \sqrt{V_i} \text{ เปอร์เซ็นต์ของ } f_0 \quad (66)$$

และ  $f_0 C_2 = 0.94 \times 10^3$  เฮิรตซ์. ไมโครฟารัด  
ในการทดลองนี้ ค่า  $V_i$  ที่ได้มีค่าสูงเกิน 200 mVrms ดังนั้น ค่า BW สามารถหาได้

จากกราฟ ในรูปที่ 34 ซึ่งในกรณีนี้จะได้

$$\begin{aligned} BW &= 14 && \text{เปอร์เซ็นต์ของ } f_0 \\ &= 13.20 && \text{เฮิรตซ์} \\ f_L &= 87.73 && \text{เฮิรตซ์} \\ f_H &= 100.94 && \text{เฮิรตซ์} \end{aligned}$$

เมื่อ  $f_L$  คือ ความถี่ต่ำสุดที่วงจรอครห์สามารถตรวจจับได้

$f_H$  คือ ความถี่สูงสุดที่วงจรอครห์สามารถตรวจจับได้

ถ้าสัญญาณที่ป้อนเข้าทางด้านอินพุท (ขา 2) มีความถี่อยู่ในย่านความถี่ระหว่าง 87.73 เฮิรตซ์ ถึง 100.94 เฮิรตซ์ จะทำให้เอาท์พุท (ขา 8) มีคักย์อยู่ในสถานะต่ำ (ประมาณ 0 โวลท์) แต่ถ้าสัญญาณที่ป้อนเข้าทางด้านอินพุทมีความถี่อยู่นอกแถบดังกล่าว จะทำให้คักย์ทางด้านเอาท์พุทอยู่ในสถานะสูง

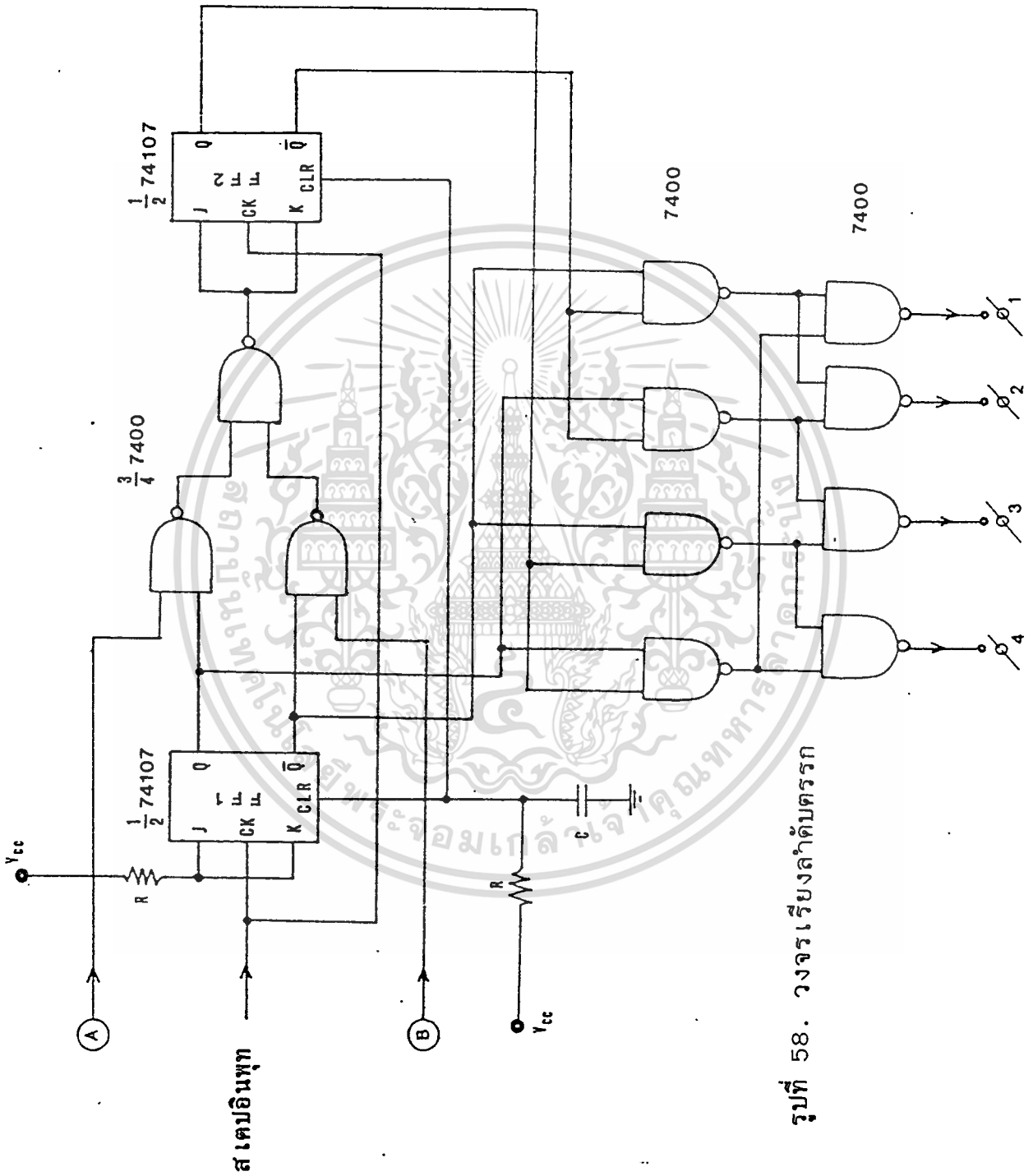
ในทางปฏิบัติเมื่อให้สัญญาณผ่านออกจากวงจร RC กรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านเข้าไปยังวงจรอครห์ในช่วงความถี่แล้ว จะปรับค่าความต้านทาน  $R_1$  (ค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ที่ปรับค่าได้) จนได้สถานะของคักย์ทางด้านเอาท์พุทขา 8 อยู่ในระดับต่ำ ถ้าปรับค่าความต้านทานนี้ต่อไป จะมีช่วงหนึ่งที่สถานะของคักย์ทางด้านเอาท์พุทมีระดับต่ำ และนอกเหนือจากช่วงนี้จะมีระดับสูง ปรับให้ค่าความต้านทานนี้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของช่วงที่ทำให้คักย์ทางด้านเอาท์พุทอยู่ในระดับต่ำ หลังจากนั้นลองใช้วัสดุทึบแสงบังด้านหน้าของไฟโตไดโอดที่อยู่ในภาครีบและขยายสัญญาณไม่ให้สัญญาณแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในไฟโตไดโอดได้ ในกรณีนี้จะทำให้สถานะของคักย์ที่เอาท์พุทขา 8 ของวงจรอครห์ในช่วงความถี่อยู่ในระดับสูง แต่ถ้านำวัสดุนั้นออกและไฟโตไดโอดสามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ ที่สะท้อนจากเป้าเนื่องจากการชี้เข้าด้วยอุปกรณ์ชี้เป้าที่ได้สร้างขึ้นนั้นได้ จะทำให้เอาท์พุทดังกล่าวมีคักย์อยู่ในระดับต่ำ ขณะนี้กล่าวได้ว่าวงจรภาครีบและขยายสัญญาณและวงจรภาคอครห์สัญญาณ 1 ชุดมีความพร้อมที่จะนำไปใช้งานต่อไป ในวงจร 1 ชุดดังกล่าวประกอบด้วยวงจรในรูปที่ 52 และวงจรในรูปที่ 54 ต่อเชื่อมโยงกัน และจะนำสถานะทางด้านเอาท์พุทของวงจรอครห์ในช่วงความถี่ไปใช้งานในภาคควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ต่อไป

เนื่องจากในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบ ประกอบไปด้วยไฟโตไดโอด 4 ตัว ดังนั้น ใน 1 ระบบ จะประกอบไปด้วยวงจร ในรูปที่ 52 และวงจร ในรูปที่ 54 จำนวน 4 ชุดแยกจากกัน มีลักษณะการทำงานและการจัดปรับเหมือนกันดังได้กล่าวผ่านมาแล้ว มีเอาท์พุทที่ออกจากวงจรอครห์ในช่วงความถี่ 4 ชุด แยกกันเป็นอิสระสำหรับอครห์สัญญาณของไฟโตไดโอดแต่ละตัว จะใช้สถานะของเอาท์พุทของวงจรอครห์ทั้ง

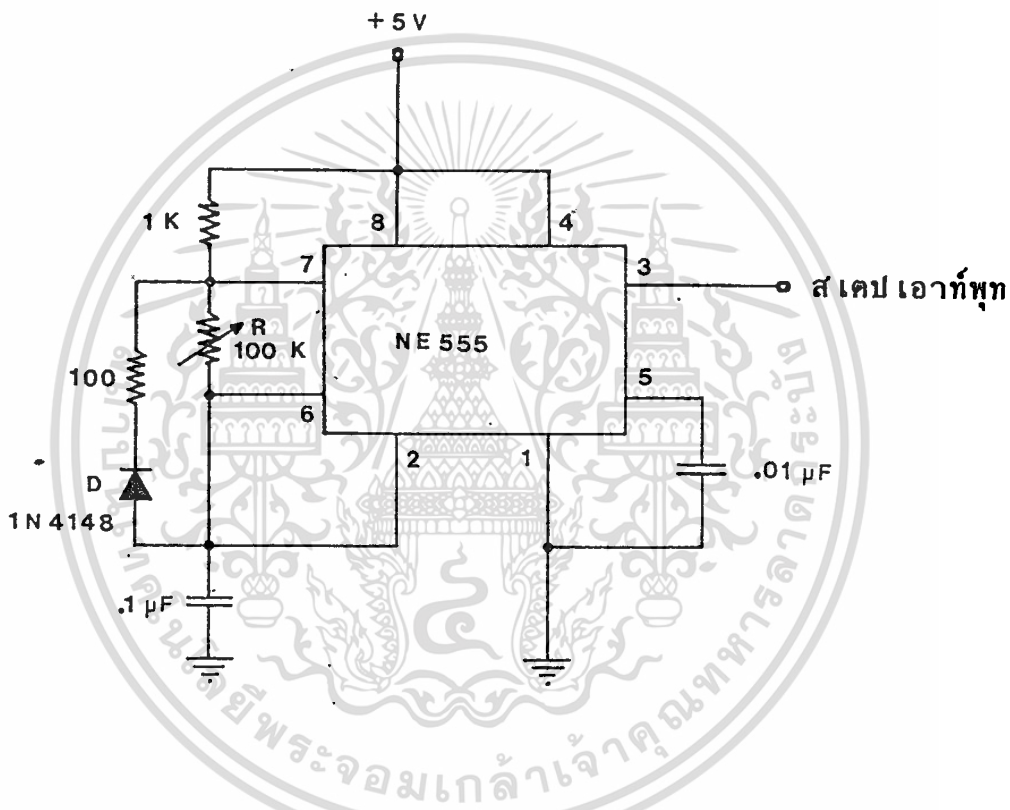
4 ชุดนี้ เป็นตัวควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของระบบใน 2 แนวแกนที่ตั้งฉากกัน ในแต่ละแนวแกนจะใช้เอาต์พุตของวงจรถอดรหัส 2 ชุด จากโฟโตไดโอดที่ติดตั้งอยู่ในแนวแกนเดียวกัน แต่อยู่ฝั่งตรงกันข้ามเป็นตัวควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกนนั้น ๆ โดยจะส่งสถานะทางค่านเอาต์พุตนี้ไปควบคุมทิศการหมุนของสเตปป์มอเตอรส์ เพื่อบังคับให้ระบบหันไปในทิศทางที่ต้องการ

### 3.2.3 ภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่

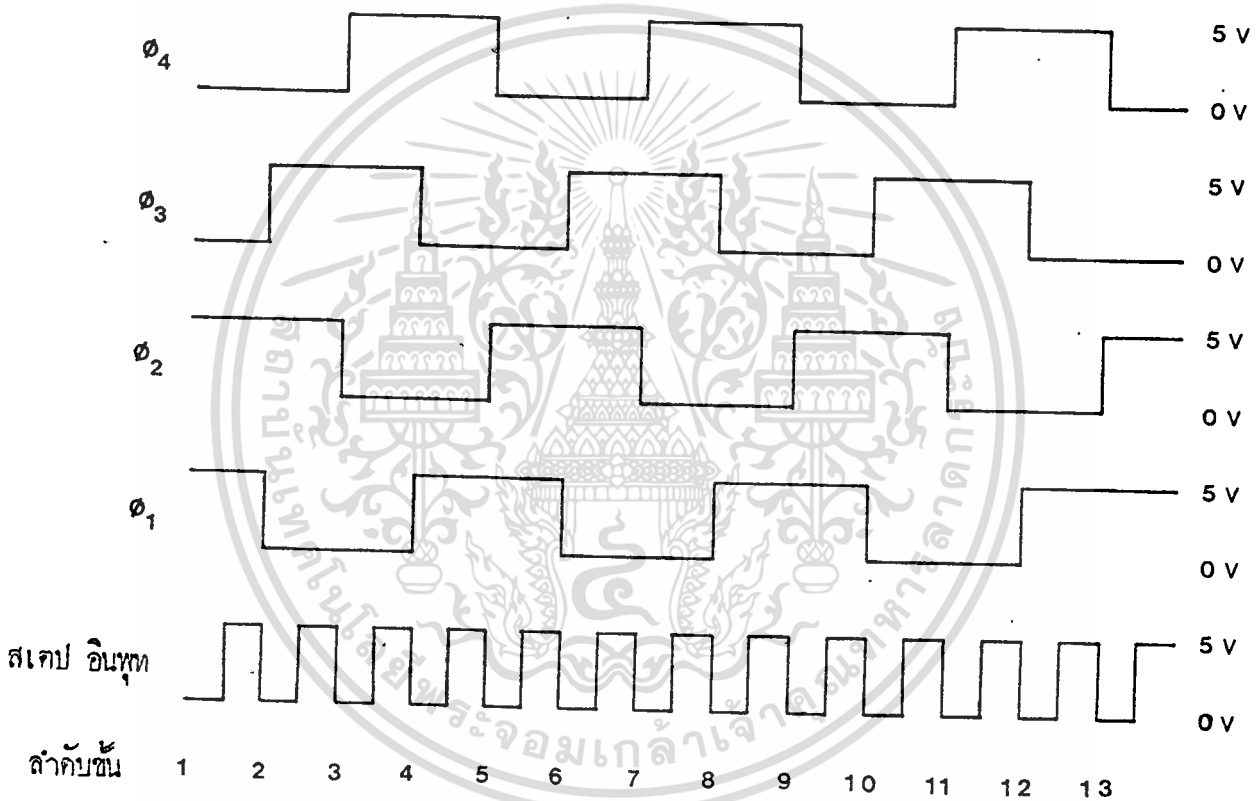
ในภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือวงจรรีเลย์ลำดับตรรก วงจรขับสเตปป์มอเตอรส์ และสเตปป์มอเตอรส์ รายละเอียดของแต่ละส่วนได้กล่าวผ่านมาแล้วในบทที่ 2 วงจรรีเลย์ลำดับตรรกที่ใช้ในการทดลองสำหรับควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ใน 1 แนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 58 สถานะทางเอาต์พุตของวงจรถอดรหัส จะถูกส่งเข้ามาควบคุมทิศทางการเรียงตรรก ซึ่งก็คือทิศทางการหมุนของสเตปป์มอเตอรส์ สำหรับการเคลื่อนที่ใน 1 แนวแกนนั้นจะมีเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสอยู่ 2 ชุด แต่ละชุดจะใช้ควบคุมทิศการหมุนของสเตปป์มอเตอรส์ให้หมุนไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ขึ้นอยู่กับสถานะของเอาต์พุตของวงจรถอดรหัสช่วงเวลาที่ทั้ง 2 ชุดนั้น เอาต์พุตของวงจรถอดรหัสหนึ่งจะถูกต่อเข้าควบคุมทิศทางการเรียงตรรกของวงจรรีเลย์ลำดับตรรก โดยต่อเอาต์พุตหนึ่งผ่านเข้าทางจุด A และอีกเอาต์พุตหนึ่งผ่านเข้าทางจุด B ช่วงเวลาในการสลับหรือความเร็วของการหมุนของสเตปป์มอเตอรส์จะถูกควบคุมโดยความถี่ของพัลส์ของสัญญาณนาฬิกา (clock pulse) ผ่านเข้าทางสเตปอินพุต (step input) ของวงจรรีเลย์ลำดับตรรกนี้ ลักษณะของวงจรถอดรหัสสัญญาณนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 59 วงจรนี้สามารถปรับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาได้ ความถี่นี้มีผลต่อความเร็วในการหมุนของสเตปป์มอเตอรส์ ถ้าสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จะทำให้แกนของสเตปป์มอเตอรส์หมุนเร็ว แต่ถ้ามีความถี่ต่ำการหมุนของแกนสเตปป์มอเตอรส์จะช้าลง วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ไอซีเบอร์ 555 ประกอบเป็นวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ มีองค์ประกอบที่เป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณ คือ ค่าความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม ความต้านทาน 100 โอห์ม ความต้านทานที่ปรับค่าได้ R (100 กิโลโอห์ม) ไดโอด D และตัวเก็บประจุ .1 ไมโครฟารัด ในช่วงที่มีการประจุ (charge) ให้กับตัวเก็บประจุ .1 ไมโครฟารัด กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายกำลัง ไปยังตัวเก็บประจุนี้ผ่านความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม และความต้านทาน R ที่ต่ออนุกรมกัน ในช่วงนี้สถานะทางเอาต์พุต 3 (step output) จะอยู่ในระดับสูง และในช่วงการคายประจุ (discharge) ของตัวเก็บประจุ .1 ไมโครฟารัด ตัวเก็บประจุนี้จะคายประจุผ่านไดโอด D ผ่านความต้านทาน 100 โอห์ม และผ่านความต้านทาน R เข้าไปยังขา 7



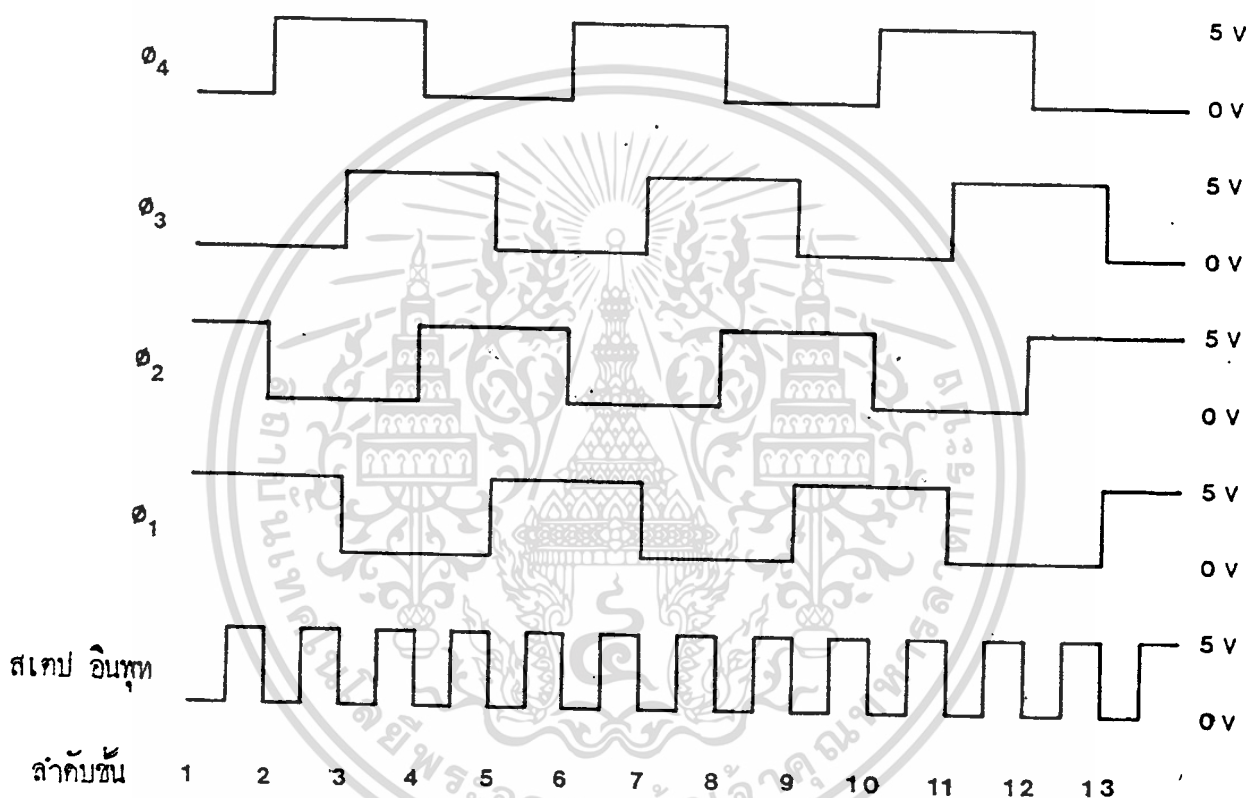
รูปที่ 58. วงจรเรียงลำดับตรรก



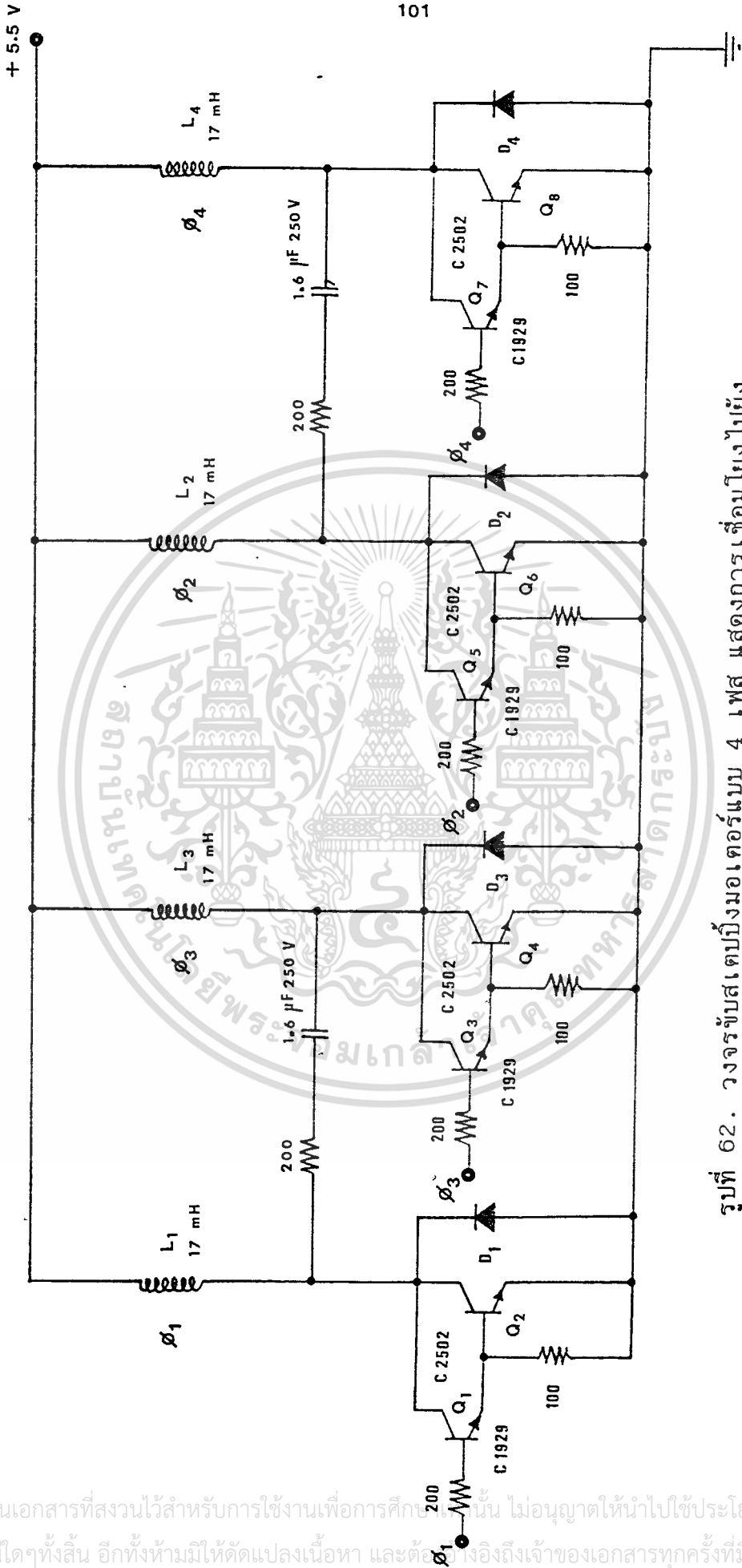
รูปที่ 59. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่ปรับความถี่ได้



รูปที่ 60. สถานะและก่ารเรียงลำดับตรรกทางด้านเอาต์พุทของวงจรเรียงลำดับตรรก สำหรับใช้กระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสแต็ปมิ่งมอเตอร์ตามลำดับสัญญาณนาฬิกา เมื่อ  $A = 0$  และ  $B = 1$



รูปที่ 61. สถานะและการเรียงลำดับตรรกทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงลำดับตรรก สำหรับใช้กระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสเตปมอเตอร์ตามลำดับสัญญาณนาฬิกา เมื่อ  $A = 1$  และ  $B = 0$



รูปที่ 62. วงจรขับสเทปเบี่ยงมอเตอร์แบบ 4 เฟส แสดงการเชื่อมโงะไปยัง  
สเทเตอร์เฟสต่าง ๆ ของสเทปเบี่ยงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้จะเห็นว่าความต้านทาน 100 โอห์ม และ R จะต่อกันแบบขนาน และสถานะทางเอาต์พุตของช่วงนี้จะอยู่ในระดับต่ำ ถ้าให้  $R_1$  คือความต้านทานรวมระหว่างความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม กับความต้านทาน R ที่ต่อกันแบบอนุกรม  $R_2$  คือความต้านทานรวมระหว่างความต้านทาน 100 โอห์ม กับความต้านทาน R ที่ต่อกันแบบขนาน  $t_1$  คือช่วงเวลาที่เอาต์พุตมีสถานะสูง และ  $t_2$  คือช่วงเวลาที่เอาต์พุตมีสถานะต่ำ จะได้

$$t_1 = 0.693 \times 0.1 \times 10^{-6} \times R_1 \quad \text{วินาที} \quad (67)$$

$$t_2 = 0.693 \times 0.1 \times 10^{-6} \times R_2 \quad \text{วินาที} \quad (68)$$

$$\text{และ } f = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad \text{เฮิรตซ์} \quad (69)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งเป็นความถี่ของการสลับ (step) ของสแตปป์มอเตอร์ ในทางปฏิบัติจะปรับค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกา โดยการปรับค่าความต้านทาน R (100 กิโลโอห์ม) ให้มอเตอร์หมุนในอัตราเร็วที่สะดวกต่อการทดลอง ต่อสัญญาณจากขา 3 (step output) ของไอซีเบอร์ 555 ของวงจรในรูปที่ 59 เข้าทางค่านสแตปอินพุต (step input) ของวงจรเรียงลำดับตรรกในรูปที่ 58 การเปลี่ยนสถานะของตรรกในวงจรเรียงลำดับตรรก จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาระหว่างการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณนาฬิกาจากสถานะสูงเป็นสถานะต่ำ การเปลี่ยนแปลงสถานะของตรรกหรืออีกนัยหนึ่ง คือการหมุนของสแตปป์มอเตอร์จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องต่อเนื่องเมื่อมีการป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้าไปทางสแตปอินพุตอย่างต่อเนื่อง โดยมีสถานะของ A และ B เป็นตัวกำหนดทิศทางการหมุนของสแตปป์มอเตอร์ดัง ได้กล่าวรายละเอียดแล้วในบทที่ 2

จากการทดลองเมื่อป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้าทางสแตปอินพุตของวงจรเรียงลำดับตรรกอย่างต่อเนื่อง โดยให้ระดับตรรกของ  $A = 0$  และ  $B = 1$  จะได้สถานะและการเรียงลำดับสถานะของตรรกเพื่อใช้กระตุ้นการทำงานของสแตปป์มอเตอร์เฟสต่างๆ ตามลำดับสัญญาณนาฬิกาดังแสดงในรูปที่ 60 และมีความสอดคล้องกันกับผลในตารางที่ 2 ในทำนองเดียวกันสำหรับกรณี  $A = 1$  และ  $B = 0$  จะได้สถานะและการเรียงลำดับสถานะของตรรกดังแสดงในรูปที่ 61 และมีความสอดคล้องกันกับผลในตารางที่ 3 วงจรเรียงลำดับตรรกในรูปที่ 58 เป็นวงจรสำหรับใช้กระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสแตปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส โดยการกระตุ้นคราวละ 2 เฟสพร้อมกัน วงจรนี้มีเอาต์พุต 4 เฟส

ซึ่งจะต่อเข้าไปในวงจรขั้วสแตมป์มอเตอร์เพื่อกระตุ้นเฟสต่าง ๆ ของสแตมป์มอเตอร์ให้มีสถานะตามลำดับที่ออกแบบเอาไว้

รูปที่ 62 แสดงวงจรขั้วสแตมป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส และแสดงการต่อวงจรขั้วสแตมป์มอเตอร์ไปยังสเตเตอร์เฟสต่าง ๆ สแตมป์มอเตอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีคุณลักษณะดังนี้

ความต้านทานต่อเฟส	= 5	โอห์ม
ความต่างศักย์ที่ระบุใช้งาน	= 5.5	โวลท์
ขนาดของมุมในแต่ละสเตป	= 1.8	องศา
กระแสที่ไหลผ่านแต่ละเฟส	= 1.1	แอมแปร์
ความเหนียวของขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส	= 17	มิลลิเฮนรี

วงจรขั้วสแตมป์มอเตอร์สำหรับแต่ละเฟสประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อกันแบบคาร์ลิงตัน (darlington) ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ประกอบเป็นวงจรขั้วสแตมป์มอเตอร์ในแต่ละเฟสสำหรับการทดลองนี้ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ C1929 ซึ่งมีค่า  $I_C(\text{max}) = 1$  แอมแปร์ มีอัตราขยายกระแสตรง  $h_{FE} = 80$  และ  $V_{CE}(\text{max}) = 500$  โวลท์ ต่อกันแบบคาร์ลิงตันกับทรานซิสเตอร์เบอร์ C2502 ซึ่งมีค่า  $I_C(\text{max}) = 12$  แอมแปร์ มีอัตราขยายกระแสตรง  $h_{FE} = 20$  และ  $V_{CE}(\text{max}) = 400$  โวลท์ ทรานซิสเตอร์เบอร์ C1929 ทำหน้าที่ขยายกระแสที่ไหลออกจากเอาต์พุทของวงจรเรียงลำดับตรรกให้เพียงพอที่จะป้อนเข้าเบสของทรานซิสเตอร์กำลังเบอร์ C2502 เพื่อให้ได้กระแสทางด้านคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์นี้เพียงพอที่จะไปขับให้ขดลวดสเตเตอร์ของเฟสที่มีวงจรขั้วสแตมป์มอเตอร์ชุดนี้ที่อยู่สามารถทำงานได้ สาเหตุที่ไม่ต่อเอาต์พุทของวงจรเรียงลำดับตรรกเข้ากับเบสของทรานซิสเตอร์เบอร์ C2502 โดยตรง เพราะกระแสที่ไหลออกทางด้านเอาต์พุทของวงจรเรียงลำดับตรรกมีปริมาณน้อย และอัตราขยายกระแสตรงของทรานซิสเตอร์นี้มีค่าต่ำ จะทำให้กระแสที่ไหลทางด้านคอลเลคเตอร์ไม่เพียงพอที่จะขับให้สแตมป์มอเตอร์ทำงานได้ จึงต้องอาศัยทรานซิสเตอร์เบอร์ C1929 ช่วยขยายกระแสดังกล่าวให้มีขนาดเพียงพอที่จะป้อนเข้าเบสของทรานซิสเตอร์ C2502 ต่อไป ค่าความต้านทาน 200 โอห์ม ที่ต่ออยู่ทางด้านเบสของทรานซิสเตอร์ C1929 ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสไม่ให้ไหลผ่านเบสมากเกินไป ซึ่งเป็นกรป้องกันไม่ให้ทรานซิสเตอร์ตัวนี้ได้รับความเสียหาย ส่วนความต้านทาน 100 โอห์ม ที่ต่ออยู่ทางด้านเบสของทรานซิสเตอร์ C2502 จะทำให้อัตราการขยายกระแสของวงจรลดลง แต่จะทำให้วงจรนี้มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิดีขึ้น และช่วยให้ช่วงเวลาในการปิดกระแสของทรานซิสเตอร์ดังกล่าวเร็วขึ้น ไคโอด  $D_1, D_2, D_3$  และ  $D_4$  ที่ต่อคร่อมวงจรขับ

สแตมป์มอเตอร์ของแต่ละเฟส ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ทรานซิสเตอร์เกิดความเสียหาย อันเนื่องมาจากการไหลย้อนกลับของยอดแหลมของกระแสที่เกิดขึ้นชั่วขณะ (transient) ความต้านทาน 200 โอห์ม และตัวเก็บประจุค่า 1.6 ไมโครฟารัด ที่ต่ออนุกรมกัน และต่อคร่อมระหว่างเฟสที่ 1 กับเฟสที่ 3 และเฟสที่ 2 กับ เฟสที่ 4 ในรูปที่ 62 ทำหน้าที่เป็นวงจรรีเฟรสเซอร์ช่วยป้องกันทรานซิสเตอร์ในวงจรมอเตอร์ไม่ให้เกิดความเสียหายในขณะที่หรือภายหลังจากที่ทรานซิสเตอร์นั้นปิดกระแส (turn off) ค่าความต้านทาน และค่าความจุของตัวเก็บประจุดังกล่าวหาได้จากสมการ (54), (55) และ (57) จากการเปรียบเทียบวงจรรูปที่ 62 กับวงจรรูปที่ 45 และสแตมป์มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ถูกออกแบบให้ทำงานโดยการกระตุ้นที่ละ 2 เฟส ตามรูปที่ 60 และรูปที่ 61 จะพบว่าเฟสที่ 1 และเฟสที่ 3 จะไม่มีโอกาสถูกกระตุ้นพร้อมกัน และในทำนองเดียวกันเฟสที่ 2 และเฟสที่ 4 จะไม่มีโอกาสถูกกระตุ้นพร้อมกันเช่นกัน ดังนั้นถ้าเฟสที่ 1 ถูกกระตุ้นให้กระแสไหลผ่าน เฟสที่ 3 จะอยู่ในสภาวะไม่ถูกกระตุ้นและไม่มีกระแสไหลผ่าน ทันทีที่ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และ  $Q_2$  ปิดไม่ให้กระแสไหลผ่าน ทรานซิสเตอร์  $Q_3$  และ  $Q_4$  จะเปิดให้กระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์เฟสที่ 3 เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องวงจรมอเตอร์ในบทที่ 2 เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสมีความต้านทานภายใน 5 โอห์ม ดังนั้นถ้าเปิดให้กระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์นี้ในสภาวะสม่ำเสมอ จากสมการ (54) จะได้

$$I_m = \frac{5.5}{5} = 1.1 \text{ แอมแปร์}$$

และจากสมการ (55) จะได้ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่ตกคร่อมระหว่างขาคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ( $V_{CE}$ ) ที่เวลาเริ่มต้นปิดกระแสดังนี้

$$V_{CE} = 1.1 \times 200 - 5.5 = 214.5 \text{ โวลต์}$$

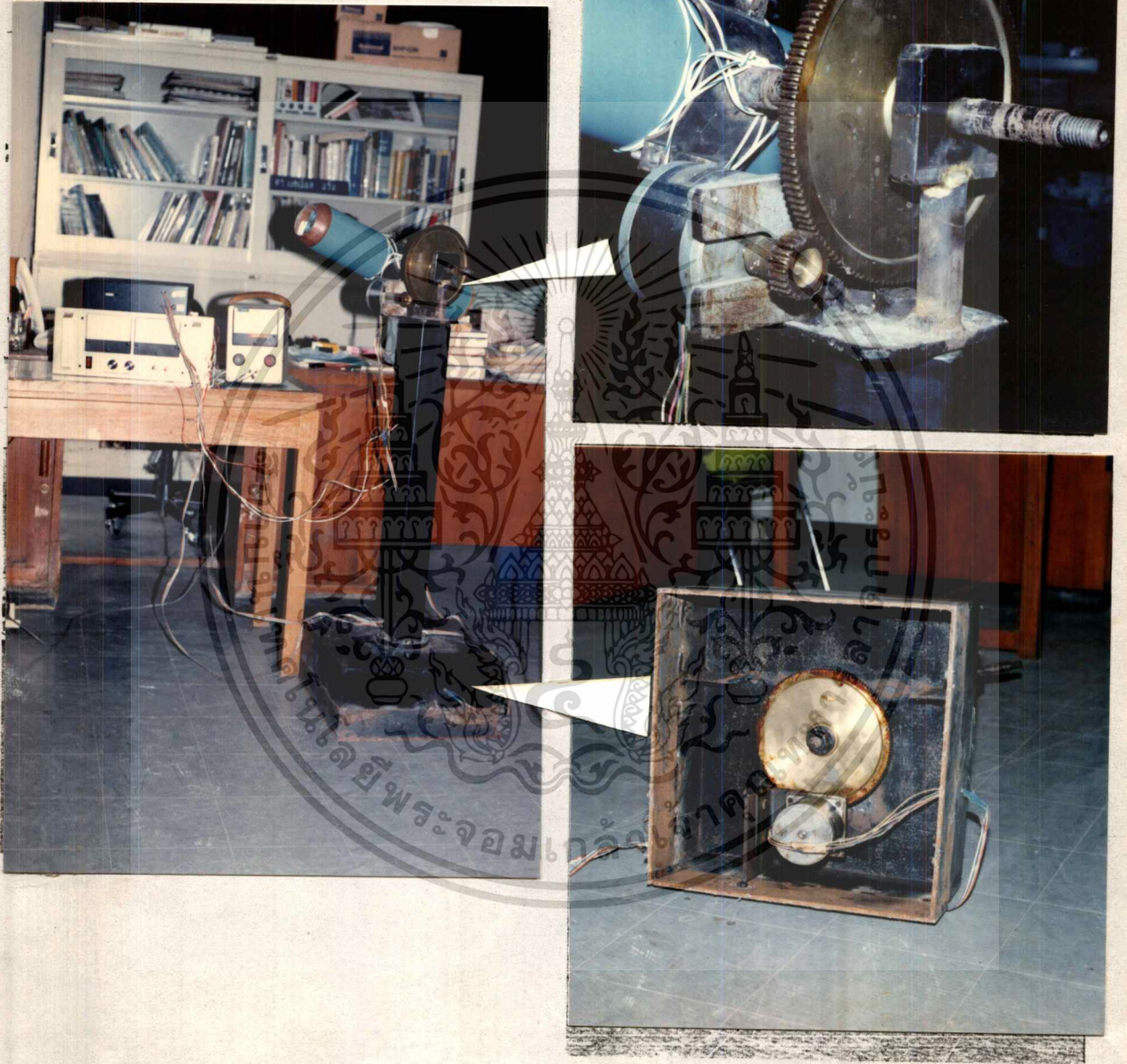
แต่ค่า  $V_{CE(max)}$  ของทรานซิสเตอร์มีค่าเท่ากับ 400 โวลต์ ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ขนาด 214.5 โวลต์ จะไม่ทำให้ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวที่ใช้ในวงจรมอเตอร์เกิดความเสียหาย เมื่อทราบค่าความต้านทานแล้ว และขดลวดสเตเตอร์ของแต่ละเฟสมีค่าความเหนี่ยวนำ 17 มิลลิเฮนรี เท่ากัน. จากสมการ (57) จะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมดังนี้

$$C = \frac{4 \times 17 \times 10^{-3}}{(200)^2} = 1.7 \text{ ไมโครฟารัด}$$

ในทางปฏิบัติใช้ตัวเก็บประจุค่า 1.6 ไมโครฟารัดแทน เนื่องจากค่า  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  และ  $L_4$  มีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่อเชื่อมระหว่างขดลวด เฟสที่ 1 กับเฟสที่ 3 และเฟสที่ 2 กับเฟสที่ 4 จะมีค่าเท่ากัน คือ 200 โอห์ม และ 1.6 ไมโครฟารัด

ขดลวด  $\emptyset_1, \emptyset_2, \emptyset_3$  และ  $\emptyset_4$  ในรูปที่ 62 คือขดลวดสเตเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์เฟสที่ 1, เฟสที่ 2, เฟสที่ 3 และเฟสที่ 4 ตามลำดับ เมื่อประกอบวงจรจับ สเตปป์มอเตอร์เข้ากับเฟสต่าง ๆ ของสเตปป์มอเตอร์ตามวงจรรูปที่ 62 เสร็จแล้ว นำเอาที่พุก  $\emptyset_1, \emptyset_2, \emptyset_3$  และ  $\emptyset_4$  ของวงจรเรียงลำดับตรรกในรูปที่ 58 มาต่อกับอินพุท  $\emptyset_1, \emptyset_2, \emptyset_3$  และ  $\emptyset_4$  ของวงจรจับสเตปป์มอเตอร์เรียงตามลำดับ โดยต่อเฟสที่มีหมายเลขตรงกันเข้าด้วยกัน ขณะนี้ภาคควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่สำหรับ 1 แนวแกนพร้อมที่จะทำงานแล้ว ถ้าป้อนสัญญาณนาฬิกา เข้าที่สแตปอินพุทและป้อนรหัสบังคับทิศทาง เข้าทาง A และ B สเตปป์มอเตอร์จะหมุนไปในทิศทางตามสถานะของตรรกที่ป้อนเข้าทาง A และ B นั้น

ลักษณะการเชื่อมโยงวงจรภาคต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ตั้งแต่ภาครับและขยายสัญญาณ ภาคถอดรหัสสัญญาณ และภาคควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่สำหรับควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ใน 1 แนวแกน ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 11 ในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบ จะมีชุดควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่จำนวน 2 ชุด ควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ใน 2 แนวแกนที่ตั้งฉากกันและเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น ในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบ จะประกอบด้วยวงจรในรูปที่ 11 จำนวน 2 ชุด ที่เหมือนกัน ในการทดลองนี้จะกระทำใน รูปแบบของการจำลอง โดยใช้ชุดควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ 1 ชุดสำหรับควบคุมทิศทาง ตอบสนองการหันเข้าหาเป้าในแนวตั้ง และใช้อีก 1 ชุด สำหรับควบคุมทิศทาง ตอบสนองการหันเข้าหาเป้าในแนวระดับ โดยการติดตั้งระบบไว้บนแท่น และใช้สเตปป์มอเตอร์ 2 ตัว ควบคุมทิศทางตอบสนองการหันเข้าหาเป้าในแนวตั้งและแนวระดับ โดยมอเตอร์ทั้งสองตัวจะถูกติดตั้งไว้บนแท่นนี้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 63 สเตปป์มอเตอร์หนึ่งตัวจะถูกติดตั้งไว้ในฐานของระบบ เพื่อบังคับให้ระบบหันตอบสนองในแนวระดับ และ สเตปป์มอเตอร์อีกหนึ่งตัวจะถูกติดตั้งไว้ส่วนบนสุดของแท่นเพื่อบังคับให้ระบบหันตอบสนองในแนวตั้ง ขณะนี้ระบบมีความพร้อมที่จะนำไปทำการทดลอง



รูปที่ 63. การติดตั้งสเตปป์มอเตอร์เข้ากับระบบจำลองของระบบติดตามเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

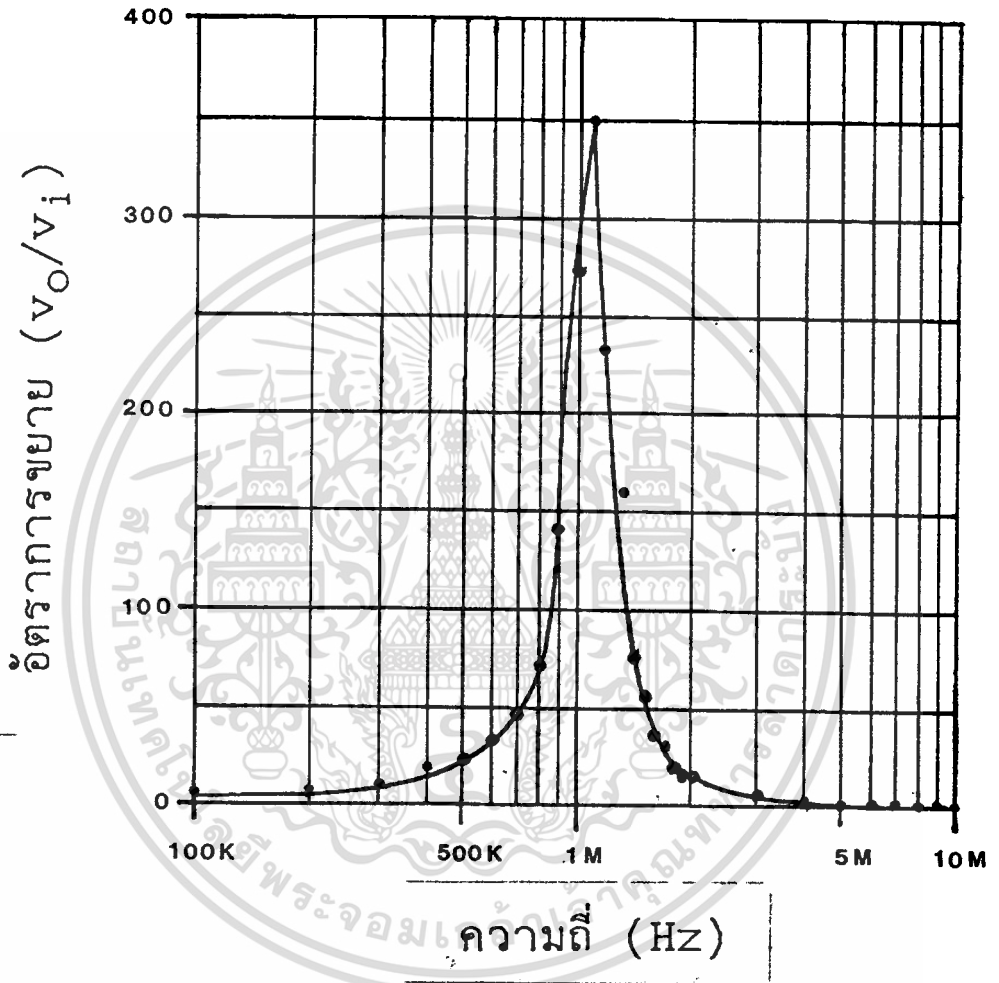
## บทที่ 4

### การทดลอง และผลการทดลอง

ในการทดลองนี้จะทำการทดลองเกี่ยวกับการตอบสนองต่อความถี่ของวงจร ภาควงจรขยายสัญญาณแบบผ่านแถบ ทดสอบหามุมมอง (view angle) ของโฟโตไดโอดที่ ประกอบเลนส์นูนช่วยในการรวมแสง เพื่อหาขนาดของมุมที่ชุดรับสัญญาณแสงสามารถตรวจ จับเป้าหมายได้ ทำการทดสอบการรับสัญญาณแสงที่ระยะห่างจากเป้าหมาย 10 เมตร เพื่อหาขนาดของสัญญาณที่ออกจากภาควงจรรับสัญญาณแสง และทดสอบการทำงานของภาคถอดรหัสสัญญาณ ทดลองหาขนาดของสัญญาณที่สะท้อนออกจากเป้าหมายที่ระยะต่าง ๆ พร้อม ทหาระยะไกลสุดที่วงจรถอดรหัสสัญญาณยังสามารถทำการถอดรหัสของสัญญาณแสงที่สะท้อน จากเป้าได้ ทดลองหาผลการตอบสนองต่อสัญญาณแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการชี้เป้าเมื่อเปลี่ยน สีของเป้าเป็นสีต่าง ๆ หลังจากนั้นจะทดสอบการเชื่อมโยงระหว่างภาคถอดรหัสสัญญาณ กับภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ เพื่อดูการตอบสนองของระบบในขณะที่ภาควงจรรับสัญญาณ แสงสามารถตรวจจับสัญญาณแสงเลเซอร์ได้ และตรวจจับไม่ได้ เนื่องจากจำกัดด้วยงบประมาณจึง ได้สร้างชุดรับสัญญาณแสงซึ่งประกอบด้วยวงจรถ่ายและขยายสัญญาณ และ วงจรภาคถอดรหัสสัญญาณ ขึ้นมาทดสอบเพียง 1 ชุด เพราะอีก 3 ชุดที่เหลือจะมีองค์ ประกอบเช่นเดียวกันกับชุดที่ใช้ในการทดสอบนี้แต่ละชุดจะทำงานอิสระ ไม่ขึ้นต่อกัน ดังนั้น ผลการตอบสนองของวงจร 3 ชุดที่เหลือจะเป็นเช่นเดียวกับที่ได้จากชุดเดียวที่ใช้ในการ ทดลองนี้ ส่วนชุดควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่จะสร้างขึ้นทดสอบทั้ง 2 แนวแกน คิดตั้งบน แทนเหล็กควบคุมให้ระบบหันไปได้ใน 2 แนวที่เป็นอิสระจากกัน คือแนวระดับและแนวตั้ง โดยใช้แกนของสเตปปีงมอเตอร์ประกอบด้วยชุดเฟือง (gear) เพื่อบังคับให้ระบบหันไป ในทิศทางที่ต้องการ การทดลองกระทำในห้องทดลองและบนช่องทางเดินของสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร ซึ่ง ในขณะที่ทำการทดลองมีแสงรบกวนจากไฟส่องสว่าง และจากสิ่งแวดล้อมภายนอกตลอด เวลา

#### 4.1 การทดลองหาผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรภาควงจรขยาย สัญญาณแบบผ่านแถบ

วงจรที่ใช้ในการทดลอง คือวงจรในรูปที่ 52 โดยปลกดตัวรับสัญญาณ แสงและปรีแอมป์ออก ป้อนสัญญาณความถี่ต่าง ๆ ผ่านเข้าทางตัวเก็บประจุค่า 1830 พิโคฟารัด ให้ขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุตมีขนาดคงที่ และวัดผลการตอบสนองต่อ การขยายสัญญาณความถี่ต่าง ๆ ทางด้านเอาต์พุตของวงจรที่คอลเลกเตอร์ของทรานซิส



รูปที่ 64. การตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ต่าง ๆ ของวงจรภาคขยายสัญญาณแบบผ่านแถบ เมื่อให้สัญญาณทางด้าอินพุตคงที่เท่ากับ 2 mV

เตอร์  $Q_2$  ในการทดลองนี้ใช้สัญญาณที่ป้อนเข้าทางคานอินพุตมีขนาดคงที่เท่ากับ 2 มิลลิโวลต์ ความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 100 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 10 เมกะเฮิรตซ์ ได้ผลการตอบสนองต่อความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 64 ความถี่ที่วงจรมอบสัญญาณตอบสนองได้ดีที่สุดมีค่าประมาณ 1.1 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้คำนวณสำหรับการออกแบบวงจร (1.176 เมกะเฮิรตซ์)

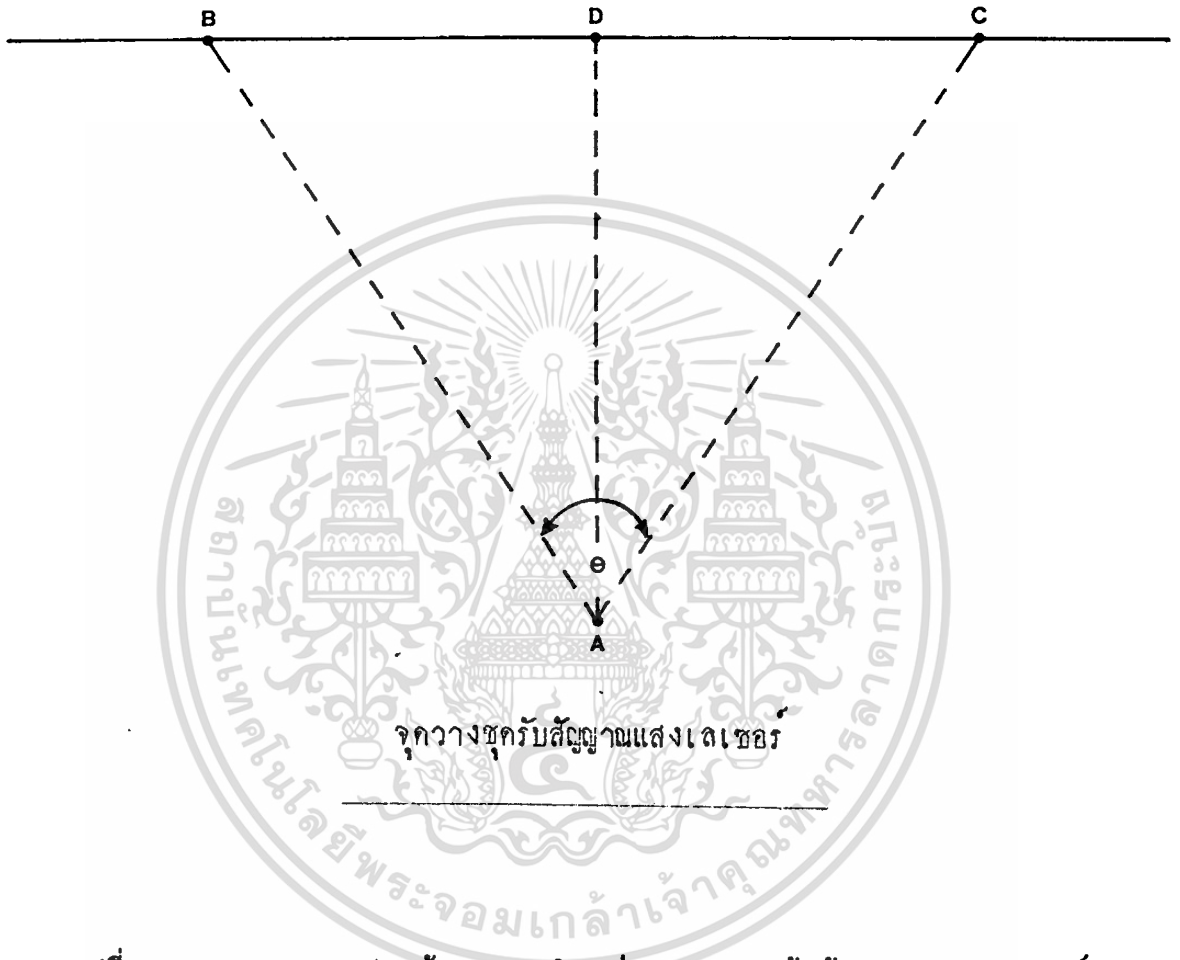
#### 4.2 การทดสอบหามุมมองของชุดรับสัญญาณแสง

การทดสอบนี้กระทำโดยใช้ฝาผนังห้องซึ่งมีแนวเป็นเส้นตรงทำหน้าที่สะท้อนแสงจากการฉายแสงเลเซอร์จากอุปกรณ์ซึ่งเป่าที่สร้างขึ้น โดยให้ระยะทางระหว่างจุดสะท้อนแสงกับอุปกรณ์ซึ่งเป่าอยู่ใกล้ชิดกันมากที่สุด เพราะจะได้บริเวณที่ถูกฉายแสงเป็นพื้นที่แคบ ๆ ตั้งอุปกรณ์ชุดรับสัญญาณแสงเลเซอร์ให้ห่างจากแนวฝาผนังประมาณ 5 เมตร โดยพยายามหันให้ไฟโตไดโอดที่ประกอบเลนส์นูนช่วยในการรวมแสงหันรับสัญญาณแสงในทิศทางตั้งฉากกับแนวฝาผนังห้อง ดังแสดงในรูปที่ 65 จุด A คือตำแหน่งที่วางชุดรับสัญญาณแสงเลเซอร์ แนว BC คือแนวฝาผนังห้อง แนว AD คือแนวเส้นตรงที่ลากจากตัวรับสัญญาณแสง (ไฟโตไดโอด) ไปตั้งฉากกับแนวฝาผนังห้องที่จุด D และหันให้ไฟโตไดโอดที่ประกอบเลนส์นูนแล้วหันเข้ารับสัญญาณแสงในแนว AD นี้ ใช้อุปกรณ์ซึ่งเป่าฉายแสงเลเซอร์ไปยังฝาผนังห้อง โดยให้อุปกรณ์นี้อยู่ใกล้ชิดฝาผนังมากที่สุด เริ่มต้นฉายแสงไปบนฝาผนัง และเลื่อนตำแหน่งที่ฉายแสงหรืออุปกรณ์ฉายแสงไปตามฝาผนังจากซ้ายไปขวา จะพบว่าจุดหนึ่งบนฝาผนังที่ชุดรับสัญญาณแสงสามารถเริ่มรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากฝาผนังที่จุดนั้นได้ ทำเครื่องหมายจุดนี้เอาไว้ซึ่งก็คือจุด B ในรูปที่ 65 เลื่อนตำแหน่งฉายแสงบนฝาผนังไปทางด้านขวาต่อไปจนถึงจุดหนึ่งที่ชุดรับสัญญาณแสงเริ่มรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากฝาผนังไม่ได้ และทำเครื่องหมายเอาไว้ ซึ่งก็คือจุด C ในรูปที่ 65 มุม BAC คือ ความกว้างของมุมมองของชุดรับสัญญาณแสงชุดนี้ วัดระยะ AD, BD และ DC จะทำให้เราหาขนาดของมุมมอง  $\theta$  จากการคำนวณทางตรีโกณมิติได้ ผลจากการทดลองได้ความกว้างของมุมมองของชุดรับสัญญาณแสงเป็นมุมประมาณ 9 องศา โดยการใช้สมการ (3) จะทำให้สามารถหาค่ามุมในการตรวจจับเป้าหมายที่ระยะต่าง ๆ ได้ การติดตั้งตัวรับสัญญาณแสงในระบบติดตามเป้าหมาย จะติดตั้งให้ตัวรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณแสงได้คลุมพื้นที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งการทดลองนี้มีตัวรับสัญญาณแสงตัวเดียวจึงไม่สามารถทดลองติดตั้งและทดสอบได้

#### 4.3 การทดสอบการรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมาย

การทดลองนี้ ใช้กระดาษขาวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 31 นิ้ว ยาว 43 นิ้ว เป็นเป้าหมาย โดยให้อุปกรณ์ซึ่งเป่าอยู่ห่างเป้าเป็นระยะ 2.5 เมตร เปิดให้

## แนวเส้นผ่าครึ่งห้อง



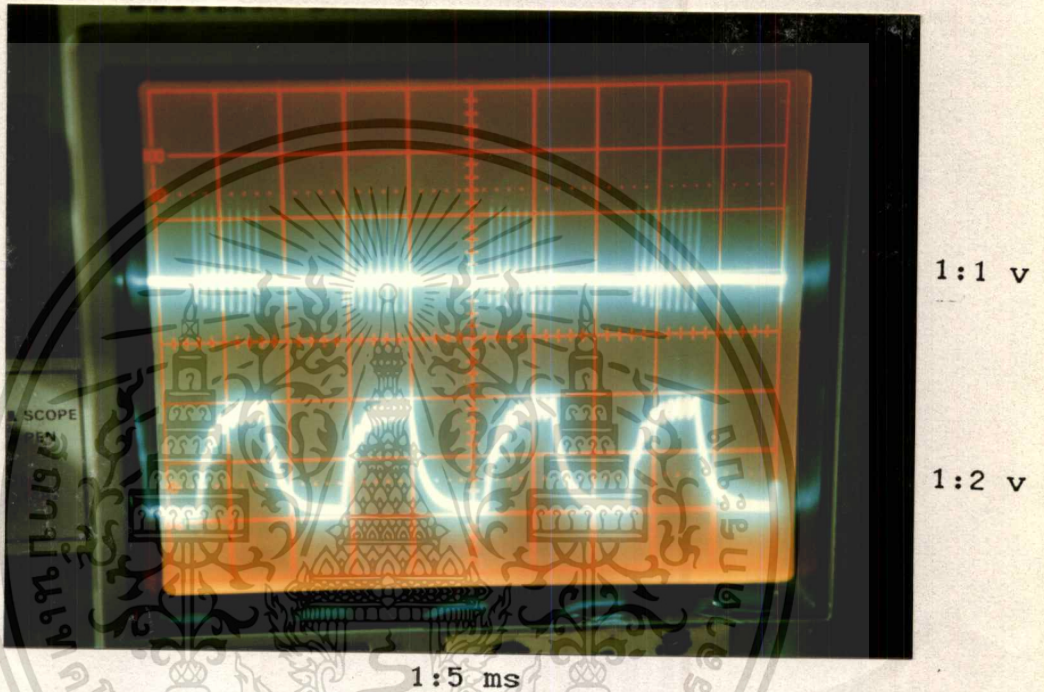
รูปที่ 65. แสดงแนวผ่าครึ่ง และตำแหน่งจุดวางชุดรับสัญญาณแสงเลเซอร์ เพื่อหาความกว้างของมุมมองของชุดรับสัญญาณแสงเลเซอร์

อุปกรณ์ซี. เป้าฉายสัญญาณแสง เลเซอร์ ไปกระทบเป้าและวางชุดรับสัญญาณแสงเพื่อรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าที่ระยะห่างจากเป้า 10 เมตร ให้ตัวรับสัญญาณแสงหันรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าให้ได้สัญญาณสูงสุด ผลจากการทดลองสามารถวัดความสูงของสัญญาณที่ออกจากเอาท์พุทของปริ๊อัมป์ได้ขนาดความสูงของสัญญาณ 5.4 มิลลิโวลต์ เมื่อถอดเลนส์นูนที่ทำหน้าที่รวมแสงให้โฟโตไดโอดออก ปรากฏว่าที่ระยะนี้ ชุดรับสัญญาณแสงไม่สามารถรับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้าได้เลย แสดงว่าเลนส์นูนมีความสำคัญในการรวมสัญญาณแสง และทำให้สัญญาณแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดมีความเข้มสูงขึ้น ประกอบเลนส์นูนเข้ากับโฟโตไดโอดในลักษณะเดิม และหันให้ชุดรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าให้ได้ขนาดสัญญาณสูงสุดดั้งเดิมแล้วตรวจสอบลักษณะสัญญาณที่ออกทางเอาท์พุทของวงจรถอดรหัสช่วงความถี่สัญญาณ ผลจากการทดลองพบว่าสัญญาณที่ออกทางเอาท์พุทของวงจรถอดรหัสช่วงความถี่สัญญาณ ผลจากการทดลองพบว่าสัญญาณที่ออกทางเอาท์พุทของวงจรถอดรหัสช่วงความถี่สัญญาณ มีการแสดงสถานะอยู่ 2 ระดับ คือ สถานะสูงกับสถานะต่ำ ในกรณีที่ชุดรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าได้ สถานะเอาท์พุทของวงจรถอดรหัสช่วงความถี่จะอยู่ในสถานะต่ำ และเมื่อใช้มือบังชุดรับสัญญาณแสงไม่ให้รับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมายได้ จะได้สถานะของเอาท์พุทวงจรถอดรหัสช่วงความถี่อยู่ในสถานะสูงคงที่ตลอดไป เมื่อเอามือที่บังชุดรับสัญญาณแสงนั้นออกสถานะทางเอาท์พุทดังกล่าวจะกลับลงสู่สถานะต่ำอีก แสดงว่าวงจรถอดรหัสของสัญญาณแสง เลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกจากอุปกรณ์ซี. เป้าได้ ในขณะที่ทำการทดลองมีสัญญาณแสงรบกวนขนาดความถี่ 50 เฮิรตซ์ จากหลอดไฟส่องสว่างภายในห้องซึ่งชุดรับสัญญาณแสงสามารถรับได้ตลอดเวลาและสัญญาณนี้ถูกขยายออกทางเอาท์พุทของวงจรถอดรหัสด้วย แต่เมื่อผ่านวงจรถอดสัญญาณความถี่แบบผ่านแถบแล้ว ความถี่นี้จะถูกกรองออก ในขณะที่ทำการทดลองพบว่าวงจรถอดรหัสช่วงความถี่สัญญาณ สามารถตอบสนองต่อการรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกจากชุดอุปกรณ์ซี. เป้าได้เป็นอย่างดี สัญญาณแสงรบกวนอื่น ๆ จากภายนอกไม่มีผลทำให้การถอดรหัสผิดพลาดแต่อย่างใด ทั้งนี้เพราะสัญญาณเหล่านั้นจะถูกกรองออกเมื่อผ่านวงจรถอดสัญญาณแบบผ่านแถบ และสัญญาณเหล่านั้นไม่ได้อยู่ในแถบความถี่ของการตรวจจับของวงจรถอดรหัสช่วงความถี่สัญญาณ จึงไม่มีผลต่อการถอดรหัสสัญญาณแสง เลเซอร์ที่ได้ออกแบบไว้แต่อย่างใด ลักษณะของสัญญาณที่ผ่านออกทางค่านเอาท์พุทของวงจรถอดสัญญาณ และเมื่อผ่านออกจากวงจรถอดความถี่ต่ำผ่านก่อนการถอดรหัสช่วงความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 66

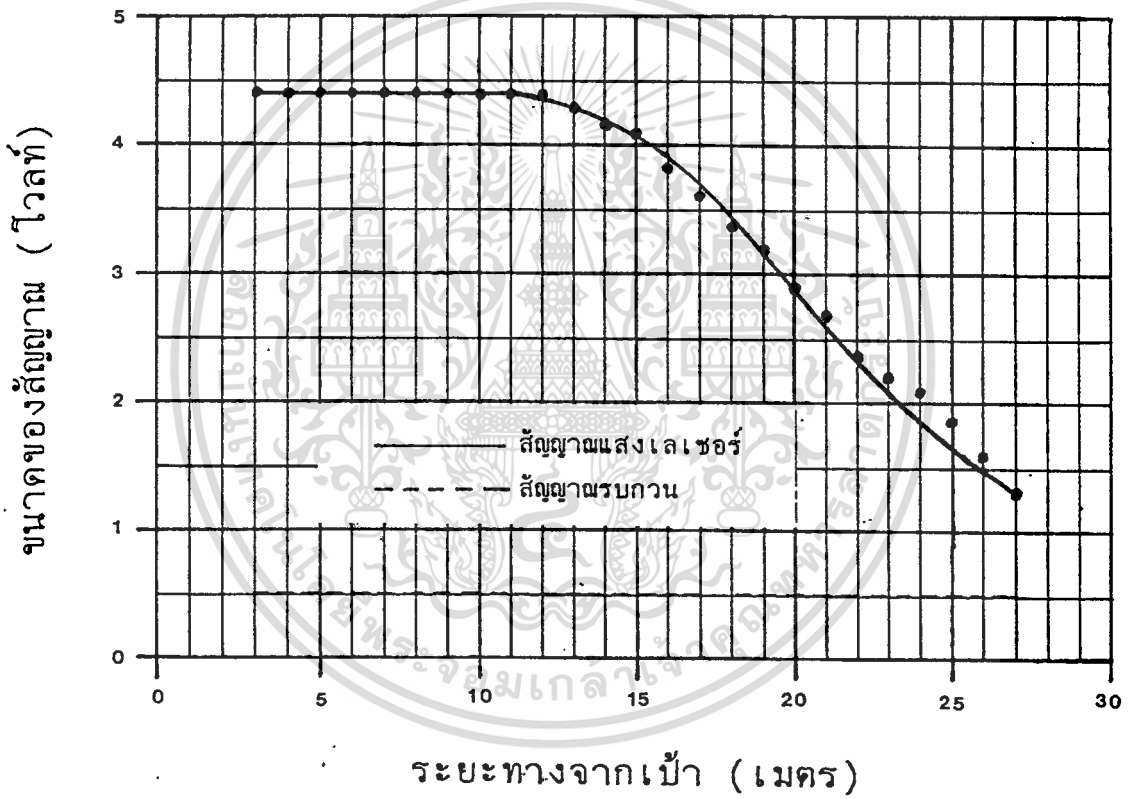
#### 4.4 การทดลองหาขนาดของสัญญาณที่สะท้อนจากเป้าที่ระยะต่าง ๆ

เปิดให้อุปกรณ์ซี. เป้าฉายแสง เลเซอร์ ไปยังแผ่นเป้าที่ระยะห่างจากเป้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 66. ลักษณะของสัญญาณที่ผ่านออกทางคานเอาต์พุทของวงจรถอดขยายสัญญาณ(บน) และเมื่อผ่านออกจากวงจรถองความถี่ต่ำผ่านก่อนการถอดรหัสช่วงความถี่(ล่าง)



รูปที่ 67. ขนาดของสัญญาณแสงเลเซอร์ที่วงจรชุดรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณสะท้อนจากเป้าหมายได้ที่ระยะต่าง ๆ

2.5 เมตร ใช้ชุดรับสัญญาณแสงที่สร้างขึ้นตามวงจรในรูปที่ 52 รับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าที่ระยะห่างจากเป้าพอสมควร ปรับให้อัตราการขยายสัญญาณของวงจรมีขนาดสูงเพิ่มขึ้น จนกว่าจะได้ขนาดของสัญญาณรบกวนที่ออกทางด้านเอาต์พุทของวงจรมีขนาดต่ำกว่า 0.6 โวลต์ เล็กน้อย (ปรับค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ 500 โอห์ม ที่คร่อมระหว่างขา 4 และขา 11 ของไอซีเบอร์ NE 592) และจะใช้อัตราการขยายนี้ตลอดการทดลอง ใช้ชุดรับสัญญาณแสงนี้รับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าที่ระยะต่าง ๆ ห่างจากเป้า พร้อมกับวัดขนาดของสัญญาณที่รับได้ที่เอาต์พุทของวงจรมีขนาดต่ำกว่า 0.6 โวลต์ เล็กน้อย ในการทดลองนี้ได้เริ่มรับสัญญาณแสงที่สะท้อนจากเป้าที่ระยะห่างจากเป้า 3 เมตร ไปจนถึงระยะ 27 เมตร ผลจากการทดลองได้ขนาดของสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่ระยะต่าง ๆ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 67 และเมื่อต่อสัญญาณจากทางด้านเอาต์พุทของภาคขยายสัญญาณเข้าไปยังวงจรมอดครัทสัญญาณเพื่อหาระยะไกลสุดที่วงจรมอดครัทสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมายได้ ผลจากการทดลองวงจรมอดครัทสัญญาณแสงได้ที่ระยะทางไกลสุด 27 เมตร และที่ระยะห่างออกไปอีกเล็กน้อยวงจรมอดครัทสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าได้บ้าง ไม่ได้บ้าง ไม่แน่นอน และในที่สุดที่ระยะห่างออกไปอีกวงจรมอดครัทสัญญาณแสงนี้ได้เลย

#### 4.5 การทดลองหาผลการตอบสนองต่อสัญญาณเมื่อเปลี่ยนสีของเป้า

ในการทดลองจะ เปิดให้อุปกรณ์รับสัญญาณแสงเลเซอร์ไปยังเป้าที่ระยะห่างจากเป้า 2.5 เมตร ใช้ชุดรับสัญญาณแสงรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าเป็นระยะทางคงที่และทำการเปลี่ยนสีของ เป้าพร้อมวัดขนาดของสัญญาณทางด้านเอาต์พุทของวงจรมีขนาดสูงที่วงจรมอดครัทสัญญาณที่รับได้จากเป้าสีต่าง ๆ เปรียบเทียบขนาดของสัญญาณที่รับได้ ในการทดลองได้ทำการวัดขนาดของสัญญาณนี้ที่ระยะทางคงที่ 2 ระยะ คือ ระยะ 6 เมตร และระยะ 8 เมตร ได้อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ (normalize) ของขนาดสัญญาณที่สะท้อนจากเป้าสีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 10 และ ตารางที่ 11 ปรากฏว่าเป้าสีขาวให้การสะท้อนสัญญาณแสงเลเซอร์ความยาวคลื่นที่กำลังใช้งานได้ดีที่สุด และเป้าสีดำให้การสะท้อนสัญญาณได้เร็วที่สุด แสดงให้เห็นถึงสีของเป้าหมายมีผลต่อขนาดของสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมายนั้น ขนาดของสัญญาณรบกวนจากการทดลองทั้งสองกรณีมีค่าเฉลี่ยคงที่เท่ากับ 0.4 โวลต์

#### 4.6 การทดสอบการเชื่อมโยงภาคมอดครัทสัญญาณเข้ากับภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ในวงจรมอดครัทสัญญาณแสงเลเซอร์ที่ในหนึ่งแนวแกน (สำหรับ

ตารางที่ 10 อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณแสงสะท้อนจากเป้าสีต่าง ๆ  
ที่ตัวรับสัญญาณแสงรับได้ ที่ระยะห่างจากเป้า 6 เมตร

สีของเป้า	อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณที่รับได้ *
ขาว	1.00
เหลือง	1.00
ส้ม	1.00
ชมพู	1.00
ม่วง	1.00
เขียว	1.00
ฟ้า	0.98
แสด	0.98
แดง	0.95
เทา	0.45
น้ำเงิน	0.36
ดำ	0.15

\* อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณรวมกัน = 0.09

ตารางที่ 11 อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณแสงสะท้อนจากเป้าสีต่าง ๆ ที่ตัวรับสัญญาณแสงรับได้ ที่ระยะห่างจากเป้า 8 เมตร

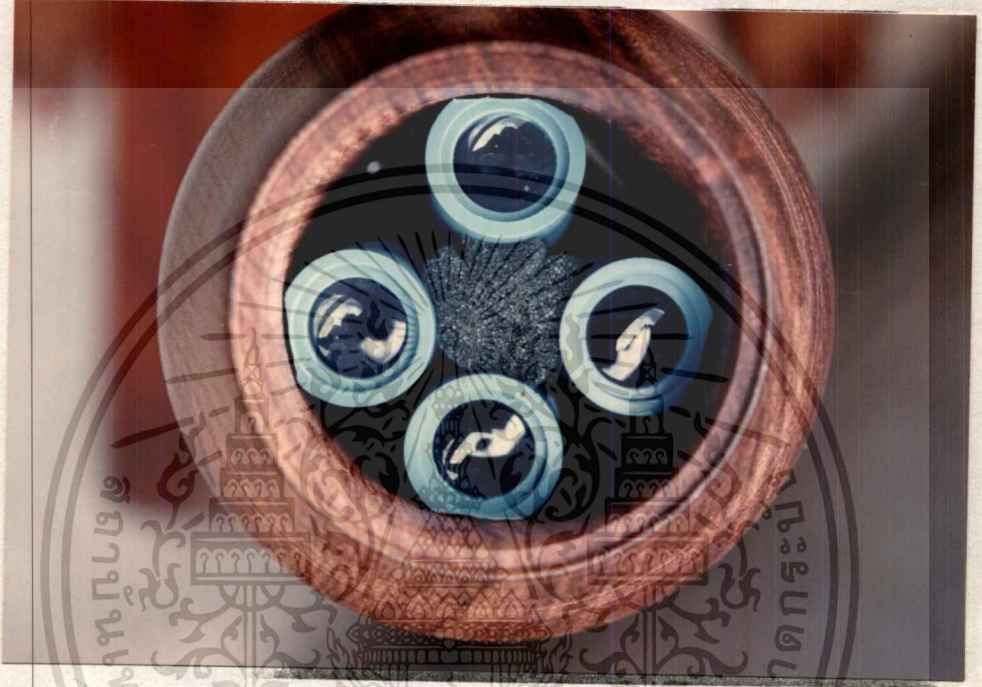
สีของเป้า	อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณที่รับได้ *
ขาว	1.00
เหลือง	0.95
ส้ม	0.95
ชมพู	0.95
ม่วง	0.95
เขียว	0.92
ฟ้า	0.92
แสด	0.89
แดง	0.84
เทา	0.37
น้ำเงิน	0.32
ดำ	0.00 (รับสัญญาณไม่ได้)

\* อัตราเฉลี่ยนอร์มอลไลซ์ของขนาดสัญญาณรบกวน = 0.11

ควบคุมทิศทางการหมุนของสเตปป์มอเตอร์ 1 ตัว) จะมีจุดบ่อนสัญญาณควบคุม ทิศทางการหมุนของสเตปป์มอเตอร์อยู่ 2 จุด จุด A และจุด B ในวงจรรูปที่ 58 คือจุดที่จะบ่อนสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุนของสเตปป์มอเตอร์ โดยทั่วไปถ้ายังไม่เชื่อมโยงสัญญาณใด ๆ เข้าไปที่จุด A และ B นี้ สถานะทางตรรกของจุดทั้งสองจะอยู่ในสถานะสูง คือ  $A=1$  และ  $B=1$  ในกรณีนี้สเตปป์มอเตอร์จะไม่หมุน และถ้าบ่อนสัญญาณให้สถานะทางตรรกของ  $A=0$  และ  $B=0$  สเตปป์มอเตอร์จะไม่หมุนเช่นกัน เนื่องจากชุดรับสัญญาณแสงที่สร้างขึ้นทดสอบมีชุดเดียว จึงมีเอาท์พุทของวงจรถอดรหัสสัญญาณเพียงเอาท์พุทเดียว ในการทดลองนี้จะใช้เอาท์พุทของวงจรถอดรหัสสัญญาณนี้ ต่อเข้ากับจุดควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่เพียงหนึ่งจุด (จุด A) อีกหนึ่งจุดที่เหลือ (จุด B) จะปล่อยให้ไว้ หรือบ่อนสถานะทางตรรกให้อยู่ในระดับสูงตลอดเวลาเสมือนหนึ่งว่าถูกต่อกับภาคถอดรหัสของชุดรับสัญญาณแสงซึ่งไม่สามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมายได้ ผลจากการทดลองพบว่าในขณะที่ยังไม่ฉายสัญญาณแสงเลเซอร์ไปยังเป้า (ชุดรับสัญญาณแสงยังไม่สามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ได้) สเตปป์มอเตอร์จะหยุดนิ่งไม่หมุน แต่เมื่อฉายสัญญาณแสงเลเซอร์ไปยังเป้าแล้ว ชุดรับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าได้ ปรากฏว่า สเตปป์มอเตอร์จะหมุนอย่างต่อเนื่องไปในทิศทางหนึ่งที่ยกที่ตลอดเวลาที่รับสัญญาณได้ เมื่อใช้มือปิดชุดรับสัญญาณไม่ให้รับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าได้ สเตปป์มอเตอร์นี้จะหยุดหมุน เมื่อเอามือออกสเตปป์มอเตอร์จะหมุนอย่างต่อเนื่องไปในทิศทางเดิม ต่อไปทดลองลับเปลี่ยนต่อภาคถอดรหัสสัญญาณเข้ากับจุดควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ที่เหลือ (จุด B) และถอดจุดที่ต่อไว้เดิม (จุด A) ออกปล่อยให้ไว้ หรือต่อกับระดับตรรก 1 คงที่ไว้ ผลที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับกรณีที่ผ่านมา แต่การหมุนของสเตปป์มอเตอร์จะหมุนในทิศที่ตรงกันข้ามกับการหมุนที่เกิดจากการเชื่อมโยงในกรณีแรก นั่นคือ ระดับตรรกที่ออกจากวงจรถอดรหัสสัญญาณสำหรับวงจรถอดรหัสสัญญาณหนึ่งชุด จะควบคุมทิศทางการหมุนของสเตปป์มอเตอร์ไปในทิศทางหนึ่งที่ยกที่แน่นอน ทำการทดลองกับภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ในหนึ่งแนวแกนที่เหลืออีกชุดหนึ่งในทำนองเดียวกันนี้ ปรากฏว่าได้ผลการตอบสนองเช่นเดียวกัน

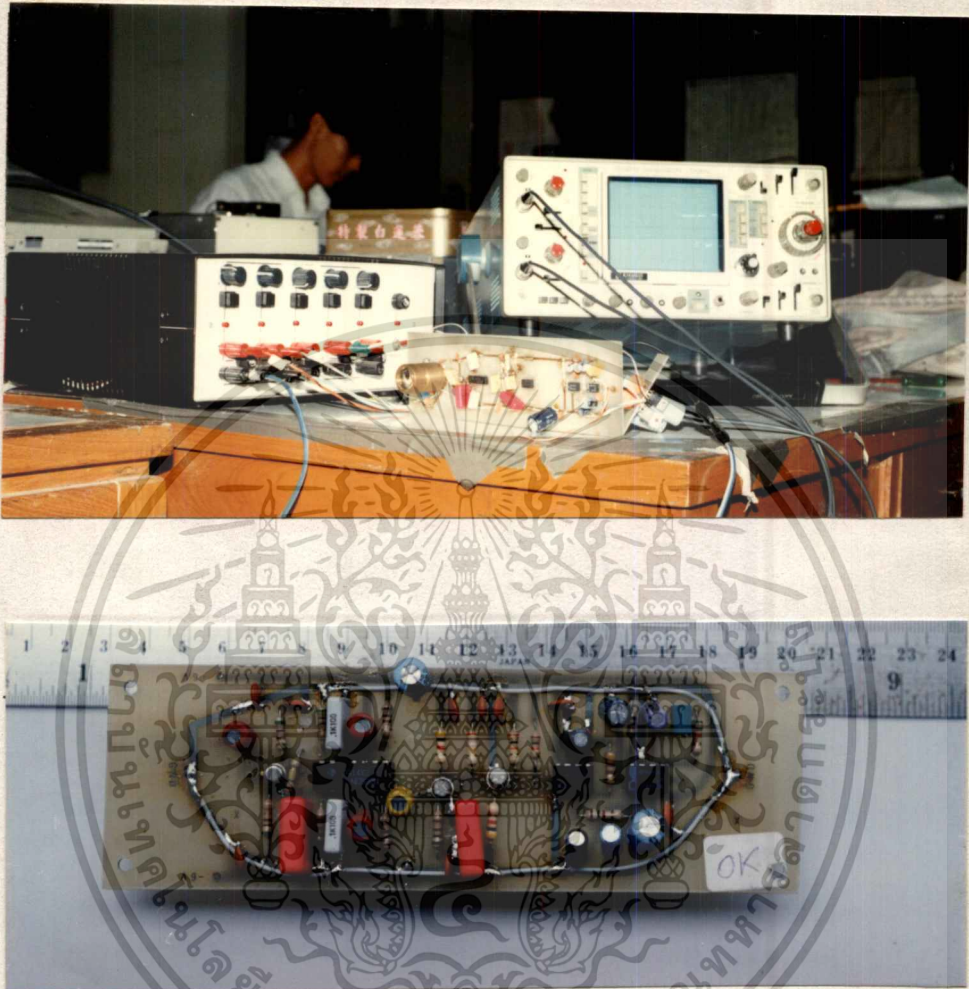
ในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบ จะมีตัวรับสัญญาณแสงทั้งหมด 4 ตัว นั่นคือ มีวงจรถอดรหัสสัญญาณอยู่ 4 ชุด มีสเตปป์มอเตอร์ 2 ตัว ซึ่งมีจุดสำหรับบ่อนสัญญาณควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่อยู่ที่ 4 จุดควบคุมทิศทางการหันเลี้ยวของระบบใน 4 ทิศทาง (จุดละ 1 ทิศทาง) ลักษณะการติดตั้งตัวรับสัญญาณเข้ากับระบบนี้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 16 ถ้าให้ตัวรับสัญญาณแสง  $D_1$  ทำหน้าที่ตรวจจับเป้าหมายที่อยู่ทางด้านบนของ

ระบบ ตัวรับสัญญาณแสง  $D_2$  จะทำหน้าที่ตรวจจับเป้าหมายที่อยู่ทางด้านล่างของระบบ ตัวรับสัญญาณแสง  $D_3$  จะทำหน้าที่ตรวจจับเป้าหมายที่อยู่ทางด้านซ้ายของระบบ และตัวรับสัญญาณแสง  $D_4$  จะทำหน้าที่ตรวจจับเป้าหมายที่อยู่ทางด้านขวาของระบบ เอาท์พุทของวงจรภาคถอดรหัสสัญญาณของตัวรับสัญญาณแสง  $D_1$  จะถูกต่อเข้าไปที่จุดควบคุมการหันเลี้ยวของระบบไปในทิศทางหันเลี้ยวขึ้นด้านบนของระบบ ในทำนองเดียวกัน เอาท์พุทของวงจรภาคถอดรหัสสัญญาณสำหรับตัวรับสัญญาณ  $D_2, D_3$  และ  $D_4$  จะถูกต่อเข้าไปที่จุดควบคุมการหันเลี้ยวของระบบไปในทิศทางหันเลี้ยวลงด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวาของระบบตามลำดับ การที่จะควบคุมให้ระบบหันเลี้ยวไปในทางทิศใดขึ้นอยู่กับ การตอบสนองต่อสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนออกจากเป้าหมาย ถ้าหากตัวรับสัญญาณแสงทางด้านใดของระบบสามารถรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมายได้ ระบบจะถูกบังคับให้หันไปทางด้านนั้นเพื่อให้ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ในทิศตรงหน้าของระบบติดตามเป้าหมายนั้น ผลการตอบสนองต่อการรับสัญญาณแสง เลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมาย และการบังคับให้ระบบหันไปในทิศทางที่ตำแหน่งเป้าหมายนั้นอยู่จะสอดคล้องกับผลที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นว่าระบบจำลองที่สร้างขึ้นทดสอบนี้ สามารถทำงานได้และสามารถนำหลักการและส่วนประกอบของวงจรในแต่ละภาคไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ ส่วนการนำระบบไปออกแบบติดตั้งใช้งานจริงนั้นเป็นเรื่องที่ละเอียดอ่อน ต้องอาศัยเทคโนโลยี การค้นคว้า เวลา และงบประมาณในการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพในการทำงานดียิ่ง ๆ ขึ้นต่อไป



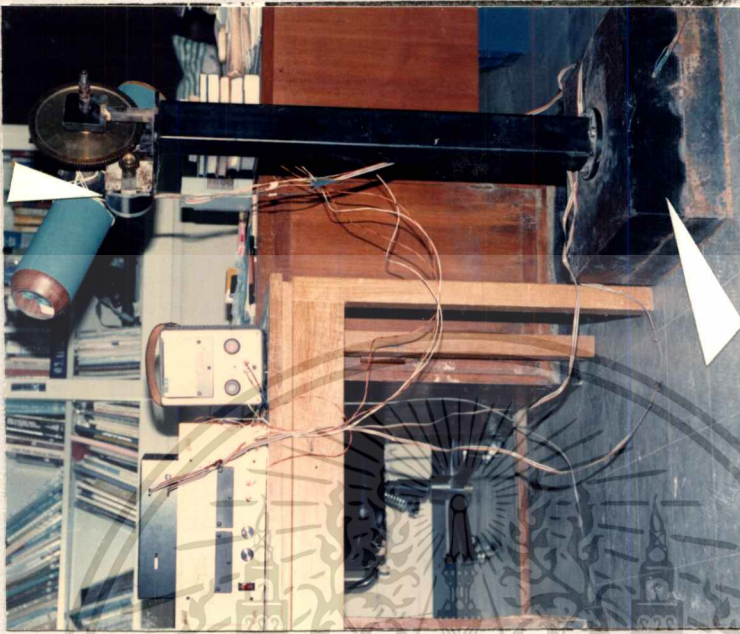
รูปที่ 69. ลักษณะการติดตั้งตัวรับสัญญาณแสงบนระบบติดตามเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

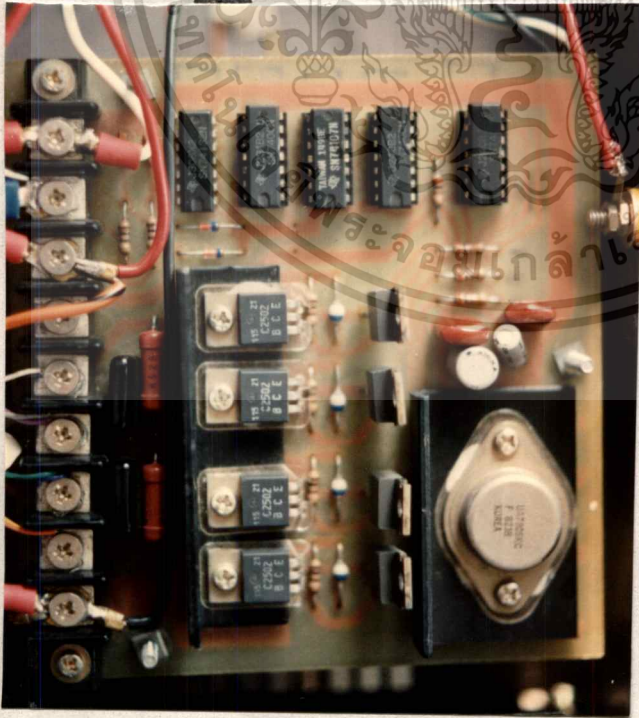


รูปที่ 70. วงจรภาคขยายสัญญาณและภาคถอดรหัสสัญญาณที่สร้างขึ้นทดสอบ

สเตอปีมอเตอร์ควบคุมการหันในแนวดิ่ง



สเตอปีมอเตอร์ควบคุมการหันในแนวระดับ



วงจรเรียงลำดับตรรก และ  
วงรับสเตอปีมอเตอร์

รูปที่ 71. ชุดอุปกรณ์ภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ที่สร้างขึ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณแสงเลเซอร์สำหรับใช้ชี้เป้าหมาย เป้าหมายที่จะถูกชี้และระบบติดตามเป้าหมาย สัญญาณแสงเลเซอร์ในลักษณะของกลุ่มสัญญาณแบบพัลส์จะถูกฉายออกจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณแสงเลเซอร์ไปกระทบที่เป้าหมาย สัญญาณแสงเลเซอร์นั้นจะสะท้อนออกจากเป้าหมาย ไปยังตัวรับสัญญาณแสงที่ติดตั้งอยู่ในระบบติดตามเป้าหมาย เมื่อตัวรับสัญญาณแสงตัวใดรับสัญญาณแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากเป้าหมายได้ จะเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่สอดคล้องกัน สัญญาณกระแสไฟฟ้าจะถูกขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบทรานซิสต์ในภาคปริแอมป์ และได้สัญญาณที่มีลักษณะสอดคล้องกันอยู่ในรูปสัญญาณความต่างศักย์ สัญญาณความต่างศักย์ที่ได้จะถูกนำไปผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่แบบผ่านแถบเพื่อกรองเอาสัญญาณรบกวนออก และนำสัญญาณไปขยายในภาคขยายสัญญาณและนำไปผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่แบบผ่านแถบเพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกอีกครั้งหนึ่ง นำสัญญาณที่ได้ไปถอดรหัสในภาคถอดรหัสสัญญาณเพื่อพิสูจน์ทราบว่า เป็นสัญญาณที่เกิดจากการชี้เป้าด้วยแสงเลเซอร์ของฝ่ายเราหรือไม่ ถ้าใช้ภาคถอดรหัสสัญญาณจะส่งสัญญาณไปยังภาคควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ เพื่อควบคุมให้ระบบติดตามเป้าหมายหันหน้าเข้าสู่เป้าหมายที่ถูกชี้ด้วยแสงเลเซอร์นั้นตลอดเวลาที่มีการชี้เป้าหมายนั้น

ผลจากการศึกษาหลักการและแนวทางทางภาคทฤษฎีในบทที่ 2 นำไปสู่การออกแบบวงจร และสร้างระบบจำลองขึ้นมาทำการทดลอง ผลของการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ผลบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ทุกประการ หลักการและวงจรต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นสำหรับการทดสอบนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์เพื่อใช้งานจริงได้ แต่อย่างไรก็ดี การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในบางกรณีต้องอาศัยการค้นคว้าเพิ่มเติม เทคโนโลยีสมัยใหม่ เวลาและงบประมาณเข้ามาเกี่ยวข้องกับคืบ ผลงานจากการวิจัยครั้งนี้จึงนับเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะนำไปสู่การวิจัยและพัฒนาต่อ ๆ ไป ในประเทศที่เจริญแล้วได้พัฒนาระบบติดตามเป้าหมายขึ้นมาใช้งานกว้างขวาง และได้ผลคุ้มค่า เช่น ใช้ในระบบเลเซอร์เรดาร์ ระบบค้นหาเป้าหมายภาคพื้นดินของอากาศยาน จรวดนำวิถีด้วยแสงเลเซอร์ที่ให้ความแม่นยำสูง ลูกกระสุนปืนใหญ่ และระเบิดนำวิถีด้วยแสงเลเซอร์ ฯลฯ

ในระบบติดตามเป้าหมายนั้น มีองค์ประกอบหลายอย่างที่สามารถที่จะช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบให้ดีขึ้น คือ

1. เลนส์นูน สามารถช่วยรวมสัญญาณแสง เลเซอร์ให้มีความเข้มของแสงสูงขึ้นก่อนสัญญาณแสงนั้นจะตกกระทบบนตัวรับสัญญาณแสง นับเป็นการช่วยขยายสัญญาณอีกวิธีหนึ่ง คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเลนส์ นับว่าเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาร่วมด้วย เพราะสารบางอย่างมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงบางความถี่ และยอมให้แสงบางความถี่ผ่านไปได้ดี สำหรับเลนส์ที่ใช้ ในการทดลองเป็นเลนส์ทั่ว ๆ ไปที่หาซื้อได้ในท้องตลาดประสิทธิภาพอาจจะไม่ดีพอ แต่ยังสามารถทำให้มองเห็นได้ว่า เลนส์นูนมีส่วนช่วยทำให้การรับสัญญาณแสงได้ดีขึ้น ถ้าหากใช้เลนส์ชนิดพิเศษที่มีการดูดกลืนแสงความถี่ที่ใช้งานน้อย การรับสัญญาณแสงยิ่งจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นและจะทำให้สามารถตรวจจับเป้าหมายที่ระยะห่างจากเป้าหมายได้ไกลยิ่งขึ้น

2. แผ่นกรองแสง (filter) สามารถกรองให้เฉพาะแสงในย่านความถี่ที่ใช้งานผ่านไป และกั้นแสงที่ความถี่อื่น ๆ ไม่ให้ผ่านไปยังตัวรับสัญญาณแสง การใช้แผ่นกรองแสงจึงสามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนภายนอกเนื่องมาจากแสงความถี่อื่น ๆ นอกแถบความถี่ที่ต้องการใช้งานได้ อย่างไรก็ตามการใช้แผ่นกรองแสงต้องเลือกให้เหมาะสมกับย่านความถี่แสงที่ต้องการใช้งาน ในการทดลองที่ผ่านมาไม่ได้ใช้แผ่นกรองแสงแต่ระบบยังสามารถทำงานได้ดี ถ้านำระบบนี้ไปใช้งานนอกห้องทดลองแสงรบกวนจากแหล่งต่าง ๆ จะมีมาก จึงมีความจำเป็นต้องใช้แผ่นกรองแสง

3. ตัวรับสัญญาณแสง ที่ใช้สำหรับการทดลองใช้โฟโตไดโอด เป็นตัวรับสัญญาณแสง ในระบบติดตามเป้าหมาย 1 ระบบจะต้องใช้โฟโตไดโอด 4 ตัว และเลนส์นูน 4 ชุด การติดตั้งให้ได้มุมมองคลุมพื้นที่ตามที่ต้องการกระทำได้ยาก และเนื่องจากมีหลายชุด จึงทำให้น้ำหนักในระบบมีค่าสูง ปัจจุบันมีการสร้างโฟโตไดโอดแบบ 4 ควอดแดรนต์ (quadrant) [4],[17] ในตัวถึงเดี่ยวกั้กันดังแสดงในรูปที่ 72 ซึ่งสามารถใช้โฟโตไดโอดแบบนี้เพียง 1 ตัวต่อ 1 ระบบ ใช้แผ่นกรองแสงและเลนส์ อย่างละ 1 แผ่น ทำให้ลดปัญหาเรื่องน้ำหนักของระบบ และง่ายต่อการติดตั้ง ลักษณะการติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 73 เลนส์นูนจะช่วยโฟกัสตำแหน่งเป้าหมายลงบนโฟโตไดโอดที่ควอดแดรนต์ต่าง ๆ ทำให้ทราบว่า เป้าหมายอยู่ทางด้านใดของระบบ โฟโตไดโอดแต่ละควอดแดรนต์จะใช้แทนโฟโตไดโอดแต่ละตัว ดังนั้น กรรมวิธีในการขยายสัญญาณ การถอดรหัสสัญญาณ และการควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ยังคงเหมือนเดิมหรือคล้ายคลึงกับของเดิมมาก การทดลองนี้ไม่ได้ใช้โฟโตไดโอดแบบ 4 ควอดแดรนต์ เพราะในขณะจัดหาอุปกรณ์การทดลองยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ชนิดนี้

4. จากการทดลองที่ผ่านมา ตัวรับสัญญาณแสงทั้ง 4 ตัว ในระบบติดตาม

เป้าหมายทำหน้าที่รับสัญญาณ การขยายและถอดรหัสสัญญาณเป็นแบบ ปิด-เปิด (on - off detection) เสถียรภาพในการควบคุมทิศการหันของระบบอาจจะไม่ดีพอ การใช้โฟโตไดโอดแบบ 4 ควอดรนต์ ทำหน้าที่รับสัญญาณแสงแบบเชิงเส้น (linear detection) ก็มีการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มของสัญญาณแสงที่ตกลงในแต่ละควอดรนต์ไปด้วยจะทำให้เสถียรภาพดังกล่าวดีขึ้น

5. วงจรภาคขยายที่มีวงจรถอดสัญญาณความถี่แบบผ่านแถบมีความจำเป็น ต้องใช้ เพราะสัญญาณรบกวนมีทั้งจากภายนอกและภายในระบบ มีความจำเป็นต้องแยก สัญญาณจริงออกจากสัญญาณรบกวนอย่างเด่นชัดก่อนนำสัญญาณ เข้าไปสู่การถอดรหัสสัญญาณ

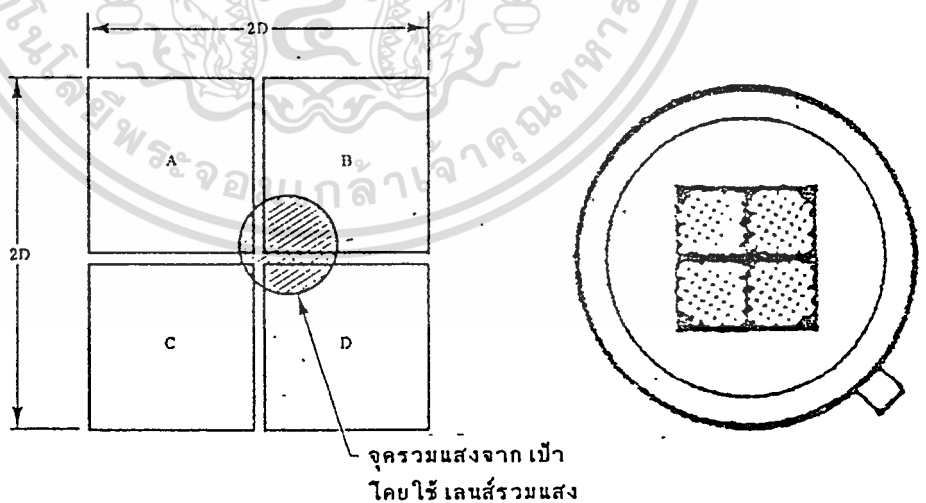
6. ในภาคควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่นั้น สัญญาณที่ส่งออกมาควบคุมทิศทาง การหันเลี้ยวของระบบมาจากวงจรถอดรหัสสัญญาณอยู่ในรูปของสถานะทางตรรกะ ดัง นั้น อุปกรณ์ทางกลที่ใช้บังคับให้ระบบติดตามเป้าหมายหันเลี้ยวตามสถานะของสัญญาณควบคุมที่ส่งออกมาจึง ไม่จำเป็นต้องเป็นสเตปป์มอเตอร์ ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง อุปกรณ์ทางกลที่ใช้ อาจจะเป็น ระบบเซอร์โวมอเตอร์ ระบบนิวเมติก ระบบไฮดรอลิก ระบบแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ฯลฯ ซึ่งการนำระบบใดระบบหนึ่งมาใช้งานจำเป็นต้องศึกษาให้ ละเอียดถี่ถ้วนเกี่ยวกับขนาด รูปร่าง แรงบิด ความรวดเร็วในการตอบสนอง แหล่งจ่าย กำลัง การเชื่อมโยงใช้งานร่วมกับภาคอื่น ๆ ตลอดจนราคา และแหล่งที่จะจัดหา ในการทดลองที่ผ่านมาใช้สเตปป์มอเตอร์ในการบังคับให้ระบบจำลองหันเลี้ยวตามที่ต้อง การ เพราะมีความง่ายในการใช้งาน สามารถควบคุมตำแหน่งได้แน่นอน มีอุปกรณ์ชนิดนี้ อยู่แล้วในห้องทดลองจึงช่วยประหยัดรายจ่าย แต่อย่างไรก็ดี สเตปป์มอเตอร์มีขนาด ใหญ่โต มีแรงบิดน้อย มีความเร็วในการตอบสนองค่อนข้างต่ำ กินกระแสค่อนข้างมาก การนำไปใช้งานบรรจุลงในระบบเล็ก ๆ ที่ต้องการน้ำหนักน้อย อาจจะไม่เหมาะสม

อุปกรณ์ที่เข้าด้วยแสงเลเซอร์ที่ดีต้องสามารถปลดปล่อยพลังงานของสัญญาณ แสงเลเซอร์ได้สูงมาก ๆ มีความถี่ของแสงเลเซอร์อยู่ในย่านที่ตัวรับสัญญาณแสงสามารถ รับได้ดี มีการสูญเสียพลังงานให้กับบรรยากาศสิ่งแวดล้อมน้อย มีรูปร่างกระทัดรัดสะดวก ที่จะนำไปใช้งาน ตลอดจนความง่ายในการใช้งาน อุปกรณ์ที่เข้าด้วยแสงเลเซอร์มี หลายแบบหลายชนิด ตัวอย่างที่นำมาใช้กันเช่น ใช้แสงเลเซอร์แบบ Nd:YAG มีความ ยาวคลื่น 1.06 ไมโครเมตร มีกำลังงานของยอดพัลส์ 1 เมกะวัตต์ ส่วนแสงเลเซอร์ที่ นำมาใช้ในการทดลองนี้ ได้จากการปลดปล่อยแสงเลเซอร์จากเลเซอร์ไดโอด แสง เลเซอร์มีความยาวคลื่น 904 นาโนเมตร ให้กำลังงานยอดพัลส์สูงสุดไม่เกิน 25 วัตต์ เป็นแสงเลเซอร์ที่มีกำลังงานค่อนข้างต่ำแต่ต้องใช้ความระมัดระวังในขณะนำมาใช้งาน มีราคาถูกเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดอื่น ๆ แต่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการ

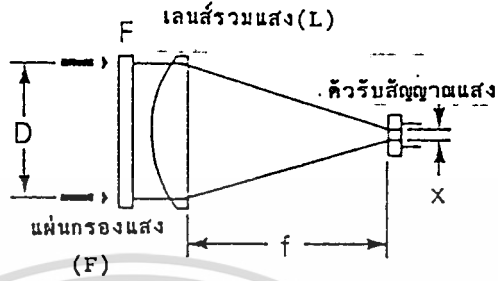
ซึ่งเป้าหมายที่อยู่ระยะไกล ๆ เพราะจำกัดด้วยขนาดของพลังงานแสง เลเซอร์ที่ปลดปล่อยออกมา

ระยะทางในการตรวจจับเป้าหมายนอกจากจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบรับสัญญาณแสงในระบบติดตามเป้าหมายและระดับพลังงานของสัญญาณแสง เลเซอร์ที่ใช้ในการชี้เป้าแล้ว คุณสมบัติเฉพาะตัวของเป้าหมายว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นกัน เช่นขนาดของเป้าหมายต้องไม่เล็กจนเกินไป ลักษณะของพื้นผิวเอื้ออำนวยต่อการสะท้อนแสงเลเซอร์ในช่วงความถี่ที่ใช้งาน ถ้าพื้นผิวของเป้าเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนสัญญาณแสงเลเซอร์ในช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ จะทำให้การตรวจจับเป้าหมายที่ระยะไกล ๆ ของระบบติดตามเป้าหมายมีขีดความสามารถลดลง การเลือกใช้ความถี่ของแสงเลเซอร์ที่จะนำมาชี้เป้าหมายจึงมีความสำคัญ

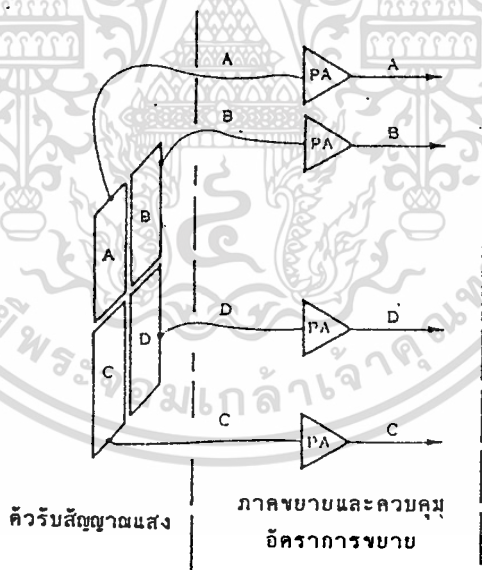
ในระบบติดตามเป้าหมายด้วยแสงเลเซอร์ที่ได้ทำการศึกษาและทดลองผ่านมานี้ เป็นเพียงแง่มุมหนึ่งของการศึกษาระบบนี้เท่านั้น อาจจะมีวิธีการอื่น ๆ ที่จะพัฒนาให้ระบบนี้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นไป ซึ่งจะได้ศึกษาและค้นคว้าในโอกาสต่อไป ผลทางทฤษฎี และผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกัน สามารถที่จะนำหลักการและวงจรต่าง ๆ ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นทดสอบไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ในทางปฏิบัติจริงได้



รูปที่ 72. โฟโตไดโอด แบบ 4 ควอดแรนท์

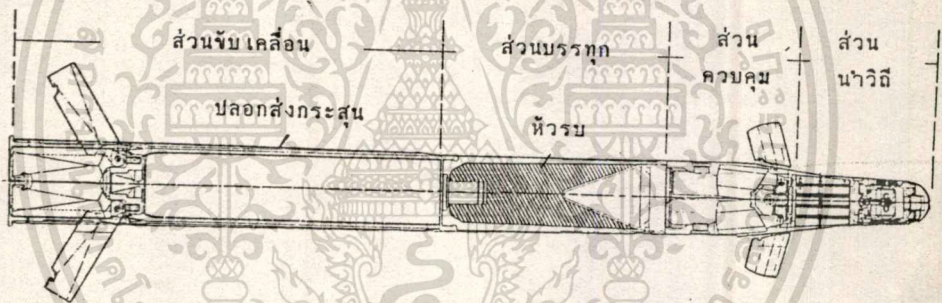
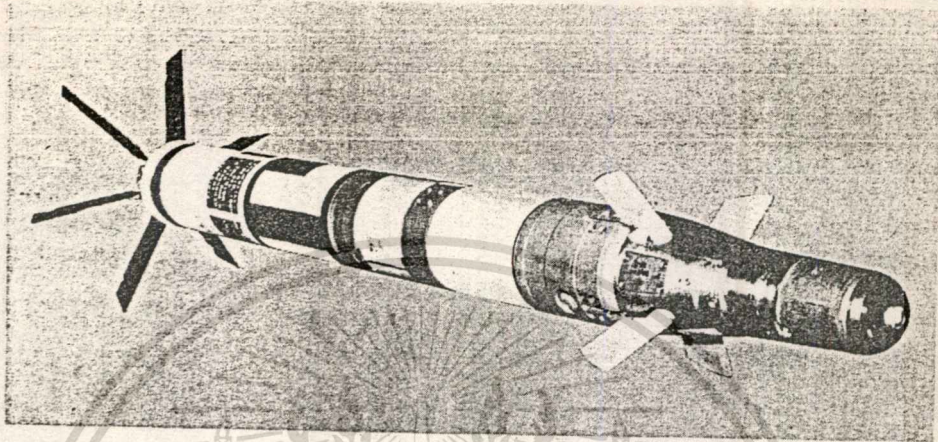


รูปที่ 73. ลักษณะการติดตั้งแผ่นกรองแสง เลนส์รวมแสง และไฟโตไดโอดแบบ 4 คอแตรนท์



รูปที่ 74. การต่อไฟโตไดโอด แบบ 4 คอแตรนท์ ไปยังวงจรภาคปริแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 75. ตัวอย่างระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์ กระสุนปืนใหญ่นำวิถีเข้าหาเป้าหมายด้วยแสงเลเซอร์ Deadeye ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว

## เอกสารอ้างอิง

- [1] R.G. Lee et al, "Guided Missiles," Brassey's Publishers Ltd., Oxford, 1983.
- [2] M. Zorgno, "The Laser for Tactical Military Applications," Military Technology, Vol.IX, No.6, pp.194-199, June 1985.
- [3] J. C. Antoniotti, "Laser Technology on the Battle Field," Military Technology, Vol.VII, No.6, pp.32-36, June 1983.
- [4] A. K. Rue, "Pulsed Laser Trackers; Tracking Systems," The Infrared Handbook, 3rd ed., pp.22-87-22-91, The Infrared Information Analysis (IRIA) Center, Environmental Research Institute of Michigan, 1989.
- [5] O. Svelto, "Principles of Lasers," Plenum Press, New York, 1976.
- [6] R. W. Campbell and F. M. Mims, "Semiconductor Diode Lasers," W. Foulsham & Co. Ltd., Slough Bucks., England, 1972.
- [7] G. Keiser, "Optical Fiber Communications," McGraw-Hill Book International Company, Tokyo, 1983.
- [8] H. Melchior, M. B. Fisher and F. R. Arams, "Photodetectors for Optical Communication Systems," Proc. IEEE, Vol. 58, No.10, pp.116-136, Oct. 1970.
- [9] S. D. Personick, N. L. Rhodes, D. C. Hanson, and K. H. Chan, "Contrasting Fiber-Optics-Component-Design Requirements in Telecommunications, Analog, and Local Data Communications Applications," Proc. IEEE, Vol.68, No.10, pp.1254-1262, Oct. 1980.
- [10] ณรงค์ หมั่นพลศรี และ ดร.แคเนียล บริน, "การวิเคราะห์และทดสอบวงจรขยายสัญญาณแบบทรานซิสเตอร์สำหรับใช้ในเครื่องรับสัญญาณแสง," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 52-57, มิถุนายน 2529.

- [11] E. M. Rips, "Discrete and Integrated Electronics," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [12] R. S. Sandige, "Digital Concepts Using Standard Integrated Circuits," McGraw-Hill Book Company, New York, 1978.
- [13] Signetics Corporation, "Handbook on Digital, Linear, and MOS Applications," Signetics Corporation, Sunnyvale, California, pp.6-1 - 6-73, 1973.
- [14] National Semiconductor Corporation, "Databook on Linear 3," 1988 ed., National Semiconductor Corporation, Santa Clara, California, pp.5-62 - 5-67, 1987.
- [15] T. Kenjo, "Stepping Motors," Clarendon Press, Oxford, 1984.
- [16] S. C. Lee, "Digital Circuits and Logic Design," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.
- [17] EG&G Photon Devices, "Photodiodes," EG&G Publications & Media Center, Waltham, Massachusetts, July 1989.

# HFD Series (1060; 1100) Ultra-Fast Photodiode/OP-AMP

## Features

- 600 V/10<sup>-6</sup> S Slew Rate Amplifier
- Groundable Case
- Temperature and Voltage Stable
- Low Voltage Operation
- Shielded Amplifier
- Wide Spectral Range

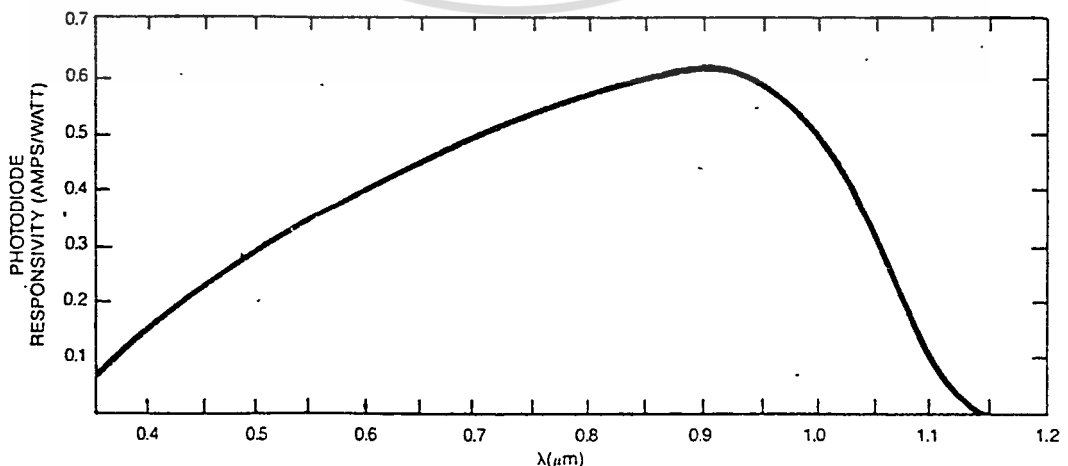
## Operating Data and Specifications at 23°C Performance at -15 V Bias (Photodiode) and ±5 V (Amplifier)

Characteristic	Minimum	Typical	Maximum	Units
Active Area	—	1.5	—	Sq. mm (HFD-1060)
Active Area	—	5.1	—	Sq. mm (HFD-1100)
Responsivity	5	6	—	10 <sup>4</sup> V/W (850 nm); R <sub>f</sub> = 100 K ohms
Responsivity	3.5	4	—	10 <sup>4</sup> V/W (633 nm); R <sub>f</sub> = 100 K ohms
Frequency Range <sup>1</sup>	DC	—	1.2	GHz
Noise Voltage	—	700	—	10 <sup>-6</sup> V RMS; R <sub>f</sub> = 100 K ohms
Minimum Detectable Power	—	1.2	—	10 <sup>-8</sup> W at 850 nm; R <sub>f</sub> = 100 K ohms
Minimum Detectable Power	—	1.3	—	10 <sup>-8</sup> W at 633 nm; R <sub>f</sub> = 100 K ohms
Open Loop Gain	—	300	—	R <sub>L</sub> ≥ 150 ohms
Bias Current <sup>2</sup>	—	5	—	10 <sup>-6</sup> A
Offset Current	—	3	—	10 <sup>-6</sup> A
Offset Voltage <sup>3</sup>	—	2	—	mV
Offset Voltage Drift	—	5	—	10 <sup>-6</sup> V/°C
Output Resistance	—	10	—	Ohms
Slew Rate	300	—	600	V/10 <sup>-6</sup> S
Supply Voltage	±5	—	±12	V
Supply Current	8	—	14	mA
Power Consumption	80	220	336	mW
Operating Temperature	0	—	70	°C

### Notes

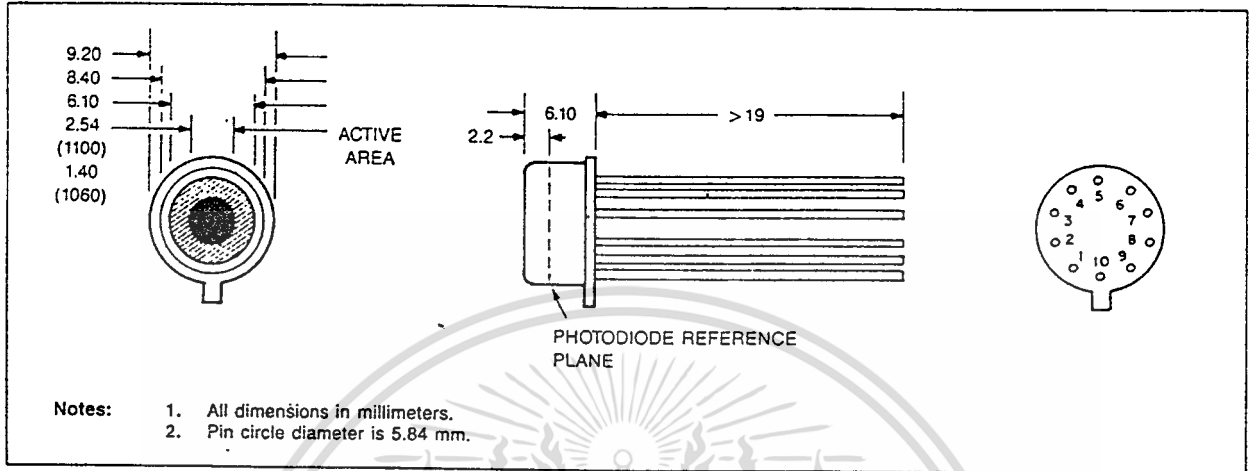
1. Gain bandwidth product.
2. Doubles every -10 °C.
3. Adjustable to 0 volts with external trimming circuit.

## Typical Spectral Response

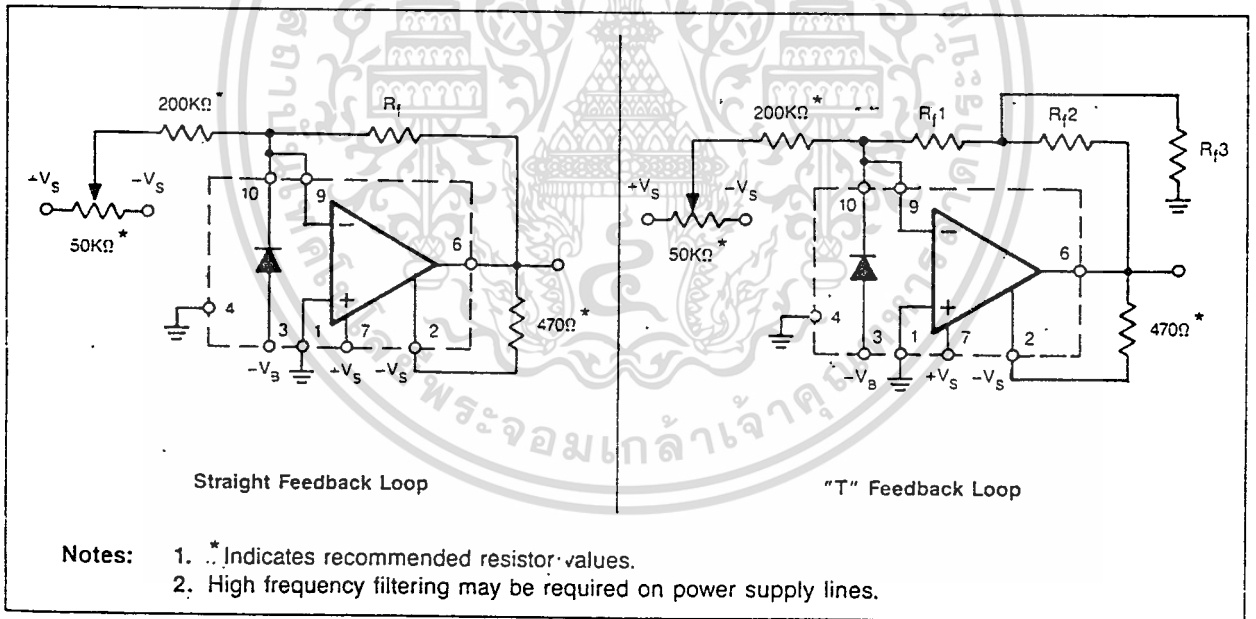


# Ultra-Fast Photodiode/OP-AMP

## Mechanical Data



## Electrical Data



## Pin Assignments

- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 _____ Signal Ground (+In) | 6 _____ Output                |
| 2 _____ -V Supply           | 7 _____ +V Supply             |
| 3 _____ -V Bias (Anode)     | 8 _____ Not Connected         |
| 4 _____ Case Ground         | 9 _____ Inverting Input (-In) |
| 5 _____ Not Connected       | 10 _____ Cathode              |



## LM592 Differential Video Amp

### General Description

The LM592 is a two stage differential input, differential output, wideband video amplifier. The use of internal series-shunt feedback gives wide bandwidth with low phase distortion and high gain stability. Emitter follower outputs provide low output impedances necessary to drive capacitive loads. This device offers fixed gains of 100 and 400 with no external components plus the flexibility of adjusting the gain from 0 to 400 with the addition of a single resistor. This flexibility also allows the device to be configured as a high pass, low pass, or band pass filter.

The LM592 is ideal for use in magnetic memory systems. The device is also very useful as a video and pulse amplifier in video recorders and other communications systems.

### Features

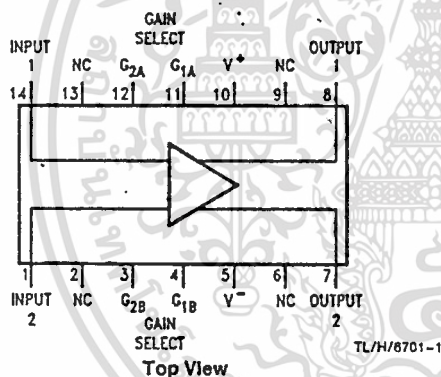
- 120 MHz bandwidth
- Adjustable gains from 0 to 400
- Adjustable pass band
- No frequency compensation required

### Applications

- Disc file memories
- Magnetic tape systems
- Thin film or plated wire memories
- Wide band video amplifiers

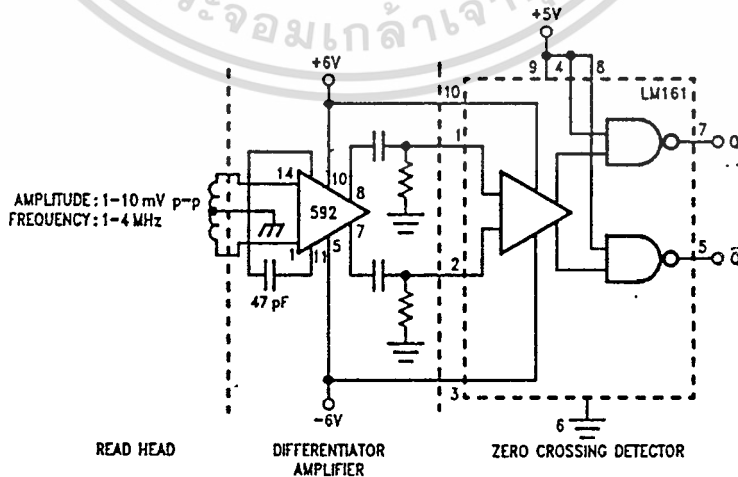
### Connection Diagram

#### Dual-In-Line and Small Outline Package



Order Number LM592M or LM592N  
See NS Package Number M14A or N14A

#### Disc/Tape Phase Modulated Readback Systems



## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Differential Input Voltage	±5V
Common Mode Input Voltage	±6V
V <sub>supply</sub>	±8V
Output Current	10 mA
Power Dissipation (Note 1)	500 mW
Junction Temperature	+150°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

Operating Temperature Range 0°C to +70°C

Soldering Information

Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

## Electrical Characteristics T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise specified, see test circuits, V<sub>S</sub> = ±6.0V (Note 5)

Characteristics	Test Circuit	Test Conditions	LM592			Units (Limit)
			Typ	Tested Limit (Note 6)	Design Limit (Note 7)	
Differential Voltage Gain Gain 1 (Note 2)	1	R <sub>L</sub> = 2 kΩ, V <sub>OUT</sub> = 3 V <sub>PP</sub>	400	250	<b>210</b>	(Min)
Gain 2 (Note 3)			100	600	<b>620</b>	(Max)
Bandwidth Gain 1	2		40			MHz
Gain 2			90			MHz
Rise Time Gain 1	2	V <sub>OUT</sub> = 1 V <sub>PP</sub>	10.5		12	ns
Gain 2			4.5			ns (Max)
Propagation Delay Gain 1	2	V <sub>OUT</sub> = 1 V <sub>PP</sub>	7.5		10	ns
Gain 2			6			ns (Max)
Input Resistance Gain 1			4		10	kΩ
Gain 2			23			kΩ (Min)
Input Capacitance		Gain 2	2			pF
Input Offset Current			0.4	5	<b>6</b>	μA (Max)
Input Bias Current			9	26	<b>31</b>	μA (Max)
Input Noise Voltage		BW = 1 kHz to 10 MHz	12			μV rms
Input Voltage Range	1			±1	±1	V (Min)
Common Mode Rejection Ratio Gain 2	1	V <sub>CM</sub> = ±1V V <sub>CM</sub> = ±1V, f = 5 mHz	86	60	<b>50</b>	dB (Min)
Gain 2			60			dB
Supply Voltage Rejection Ratio Gain 2	1	ΔV <sub>S</sub> = ±0.5V	70	50	<b>50</b>	dB (Min)
Output Offset Voltage Gain 1	1	R <sub>L</sub> = ∞	0.35	0.75	<b>0.75</b>	V (Max)
Output Common Mode Voltage (Note 4)	1	R <sub>L</sub> = ∞	2.9	2.4	<b>2.4</b>	V (Min)
				3.4	<b>3.4</b>	V (Max)
Output Voltage Swing	1	R <sub>L</sub> = 2k	4	3	<b>3</b>	V (Min)
Output Sink Current			3.6	2.5	<b>2.3</b>	mA (Min)
Output Resistance			20			Ω
Power Supply Current	1	R <sub>L</sub> = ∞	18	24	<b>24</b>	mA (Max)

Note 1: For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on a thermal resistance of θ<sub>JA</sub> and T<sub>Jmax</sub>. θ<sub>JA</sub> = 90°C/W in the "N" package and 135°C/W in the "M" package. T<sub>Jmax</sub> = 150°C.

Note 2: Pins G1A and G1B connected together.

Note 3: Pins G2A and G2B connected together.

Note 4: Gain select pins open. Output Common Mode Voltage = (V<sub>O1</sub> + V<sub>O2</sub>)/2.

Note 5: Boldface numbers apply at temperature extremes.

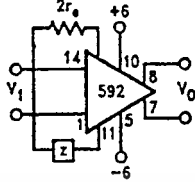
Note 6: Guaranteed and 100% production tested.

Note 7: Guaranteed (but not 100% production tested) over the operating temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Typical Applications

#### Filter Networks



TL/H/6701-3

$$\frac{V_0(s)}{V_1(s)} = \frac{1.4 \times 10^4}{Z(s) + 2r_0}$$

$$= \frac{1.4 \times 10^4}{Z(s) + 32}$$

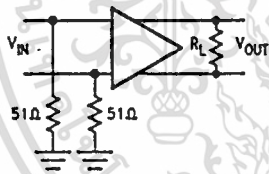
BASIC CONFIGURATION

Impedance Network	Desired Filter	$\frac{V_0(s)}{V_1(s)}$ Transfer Function
<p>TL/H/6701-10</p>	Low Pass	$\frac{1.4 \times 10^4}{L} \left[ \frac{1}{s + R/L} \right]$
<p>TL/H/6701-11</p>	High Pass	$\frac{1.4 \times 10^4}{R} \left[ \frac{1}{s + 1/RC} \right]$
<p>TL/H/6701-12</p>	Band Pass	$\frac{1.4 \times 10^4}{L} \left[ \frac{s}{s^2 + R/Ls + 1/LC} \right]$
<p>TL/H/6701-13</p>	Band Reject	$\frac{1.4 \times 10^4}{R} \left[ \frac{s^2 + 1/LC}{s^2 + 1/LC + s/RC} \right]$

Note: In the networks above, the R value used is assumed to include  $2r_0$ , or approximately  $32\Omega$

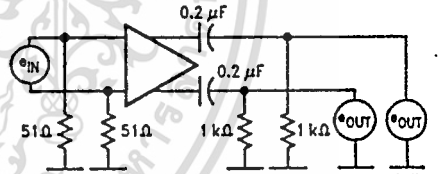
### Test Circuits

#### Test Circuit 1



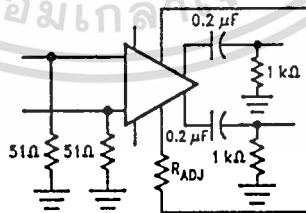
TL/H/6701-4

#### Test Circuit 2



TL/H/6701-5

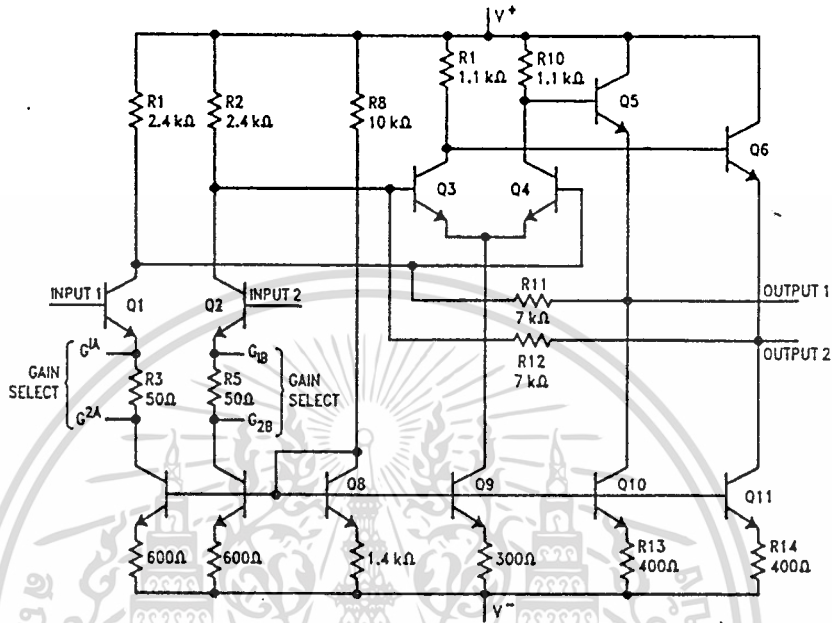
#### Voltage Gain Adjust Circuit



TL/H/6701-6

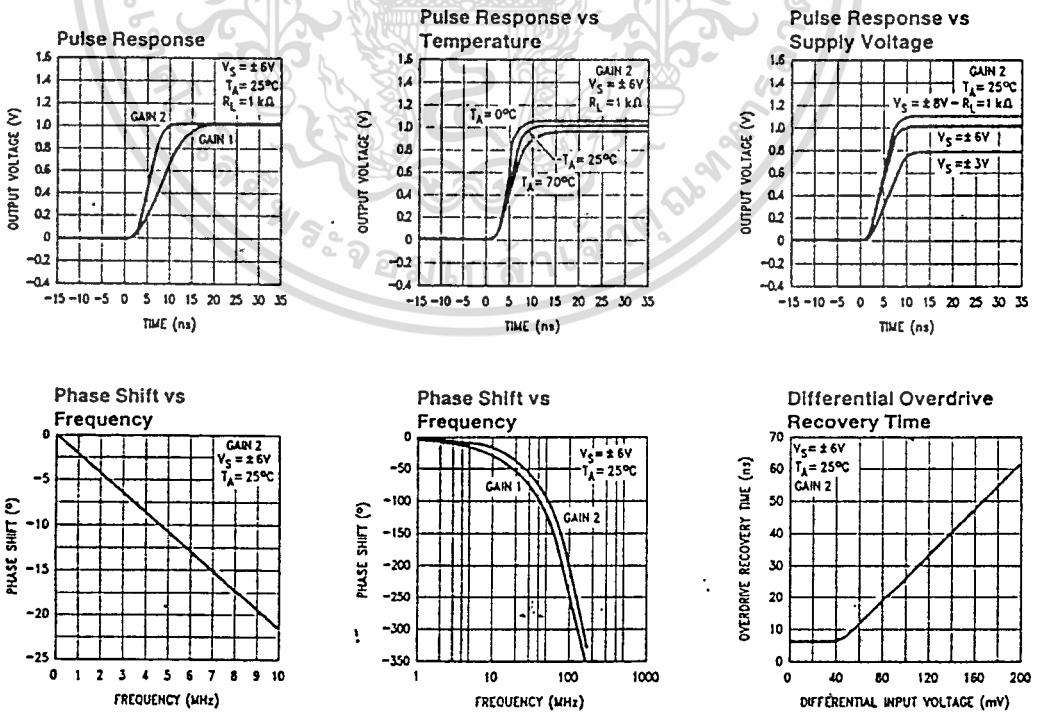
$V_s = \pm 6V$   
 $T_A = 25^\circ C$

Schematic Diagram



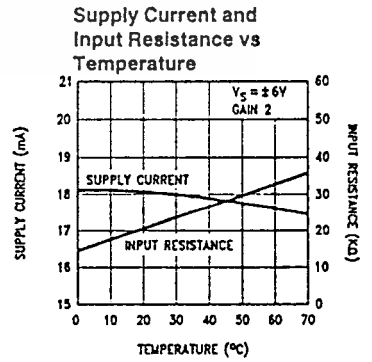
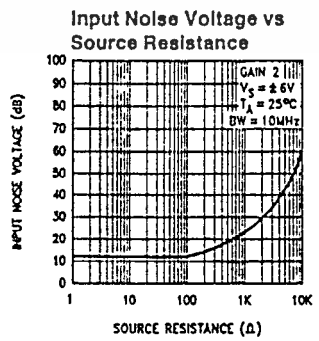
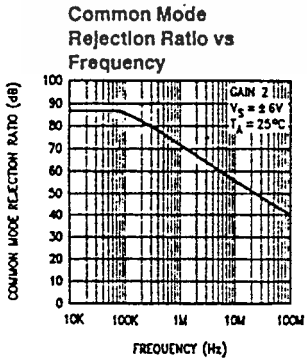
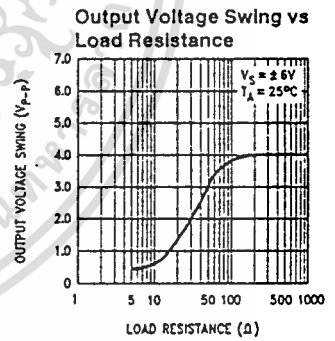
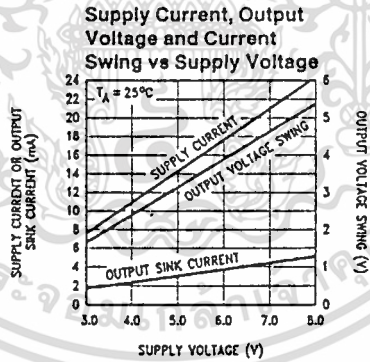
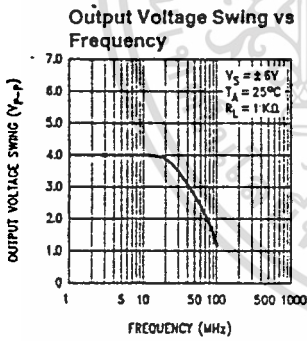
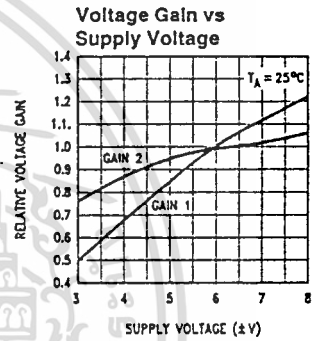
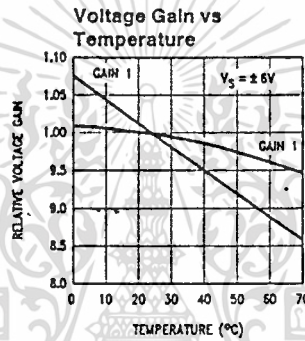
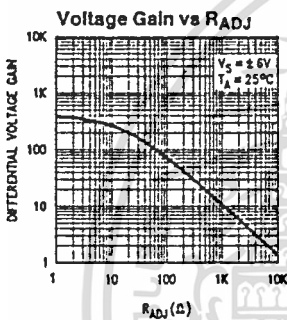
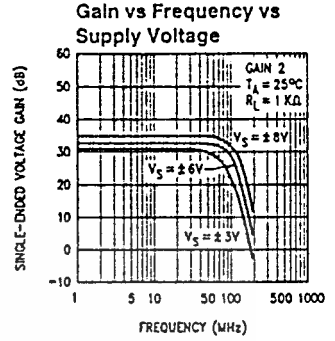
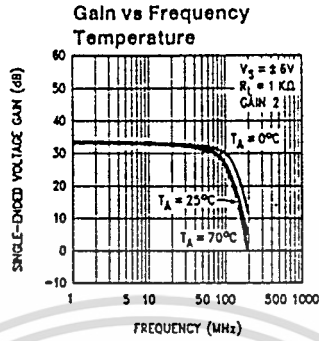
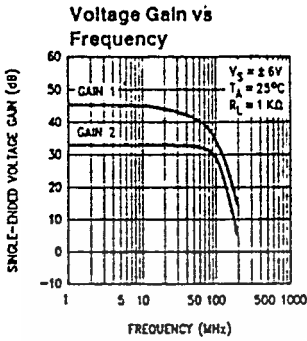
TL/H/6701-7

Typical Performance Characteristics



TL/H/6701-8

Typical Performance Characteristics (Continued)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## LM567/LM567C Tone Decoder

### General Description

The LM567 and LM567C are general purpose tone decoders designed to provide a saturated transistor switch to ground when an input signal is present within the passband. The circuit consists of an I and Q detector driven by a voltage controlled oscillator which determines the center frequency of the decoder. External components are used to independently set center frequency, bandwidth and output delay.

### Features

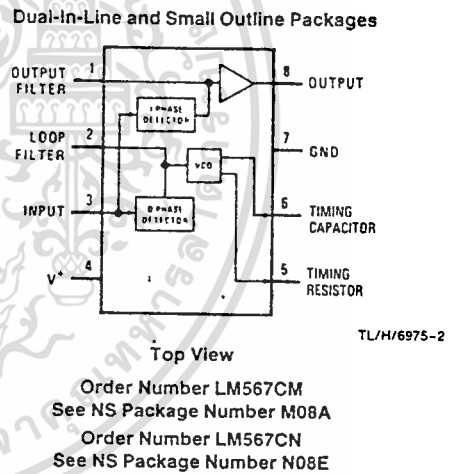
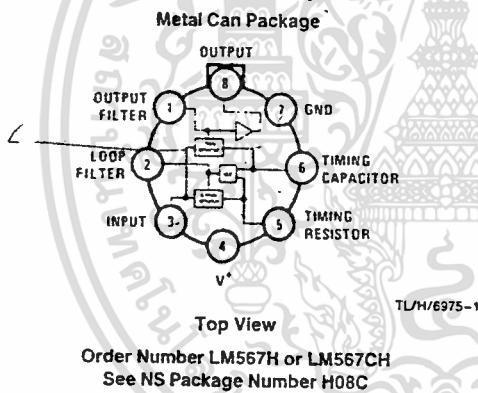
- 20 to 1 frequency range with an external resistor
- Logic compatible output with 100 mA current sinking capability

- Bandwidth adjustable from 0 to 14%
- High rejection of out of band signals and noise
- Immunity to false signals
- Highly stable center frequency
- Center frequency adjustable from 0.01 Hz to 500 kHz

### Applications

- Touch tone decoding
- Precision oscillator
- Frequency monitoring and control
- Wide band FSK demodulation
- Ultrasonic controls
- Carrier current remote controls
- Communications paging decoders

### Connection Diagrams



## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage Pin	9V
Power Dissipation (Note 1)	1100 mW
$V_B$	15V
$V_3$	-10V
$V_3$	$V_4 + 0.5V$
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Operating Temperature Range	
LM567H	-55°C to +125°C
LM567CH, LM567CM, LM567CN	0°C to +70°C

### Soldering Information

Dual-In-Line Package	
Soldering (10 sec.)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 sec.)	215°C
Infrared (15 sec.)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

## Electrical Characteristics AC Test Circuit, $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_+ = 5V$

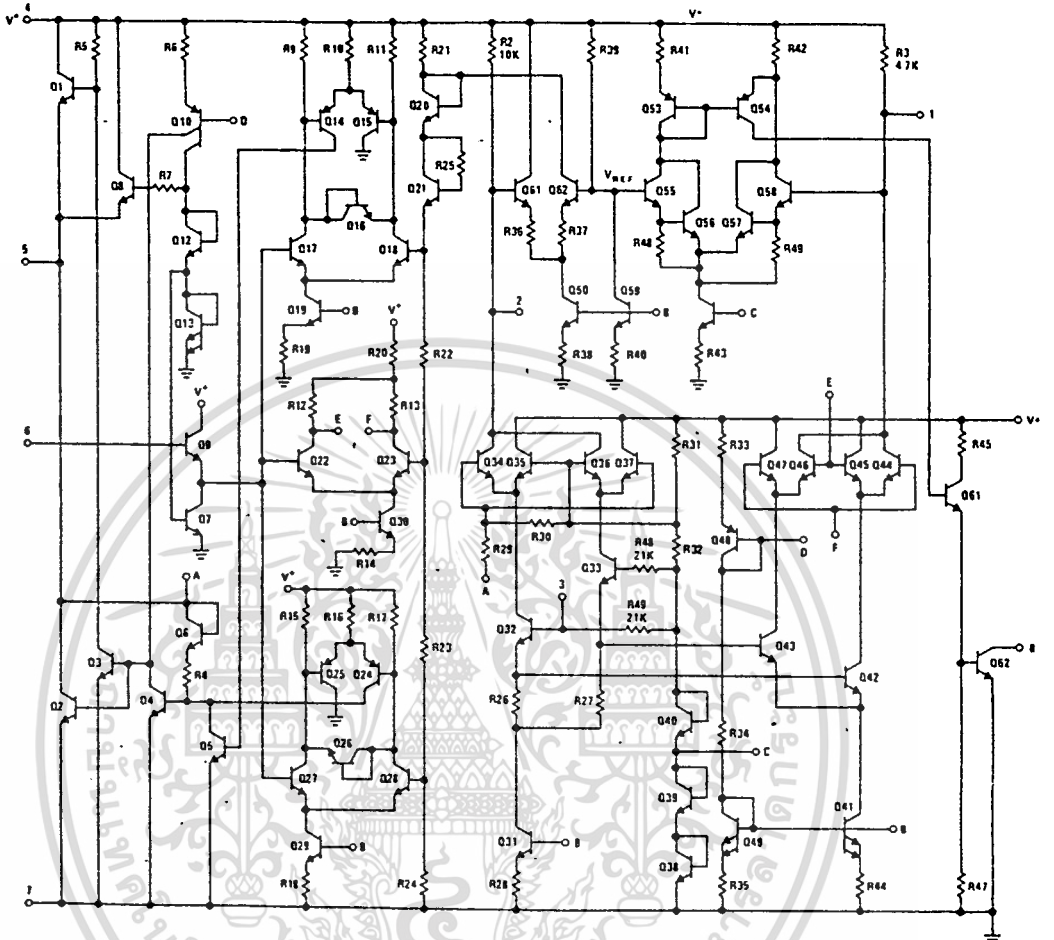
Parameters	Conditions	LM567			LM567C/LM567CM			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Power Supply Voltage Range		4.75	5.0	9.0	4.75	5.0	9.0	V
Power Supply Current Quiescent	$R_L = 20k$		6	8		7	10	mA
Power Supply Current Activated	$R_L = .20k$		11	13		12	15	mA
Input Resistance		18	20		15	20		k $\Omega$
Smallest Detectable Input Voltage	$I_L = 100 \text{ mA}$ , $f_i = f_o$		20	25		20	25	mVrms
Largest No Output Input Voltage	$I_C = 100 \text{ mA}$ , $f_i = f_o$	10	15		10	15		mVrms
Largest Simultaneous Outband Signal to Inband Signal Ratio			6			6		dB
Minimum Input Signal to Wideband Noise Ratio	$B_n = 140 \text{ kHz}$		-6			-6		dB
Largest Detection Bandwidth		12	14	16	10	14	18	% of $f_o$
Largest Detection Bandwidth Skew			1	2		2	3	% of $f_o$
Largest Detection Bandwidth Variation with Temperature			$\pm 0.1$			$\pm 0.1$		%/ $^\circ\text{C}$
Largest Detection Bandwidth Variation with Supply Voltage	4.75 - 6.75V		$\pm 1$	$\pm 2$		$\pm 1$	$\pm 5$	%V
Highest Center Frequency		100	500		100	500		kHz
Center Frequency Stability (4.75-5.75V)	$0 < T_A < 70$ $-55 < T_A < +125$		$35 \pm 60$ $35 \pm 140$			$35 \pm 60$ $35 \pm 140$		ppm/ $^\circ\text{C}$ ppm/ $^\circ\text{C}$
Center Frequency Shift with Supply Voltage	4.75V - 6.75V 4.75V - 9V		0.5	1.0		0.4	2.0	%/V %/V
Fastest ON-OFF Cycling Rate			$f_o/20$			$f_o/20$		
Output Leakage Current	$V_B = 15V$		0.01	25		0.01	25	$\mu\text{A}$
Output Saturation Voltage	$e_i = 25 \text{ mV}$ , $I_B = 30 \text{ mA}$ $e_i = 25 \text{ mV}$ , $I_B = 100 \text{ mA}$		0.2	0.4		0.2	0.4	V
Output Fall Time			30			30		ns
Output Rise Time			150			150		ns

Note 1: The maximum junction temperature of the LM567 and LM567C is 150°C. For operating at elevated temperatures, devices in the TO-5 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W, junction to ambient or 45°C/W, junction to case. For the DIP the device must be derated based on a thermal resistance of 110°C/W, junction to ambient. For the Small Outline package, the device must be derated based on a thermal resistance of 160°C/W, junction to ambient.

Note 2: Refer to RETS567X drawing for specifications of military LM567H version.

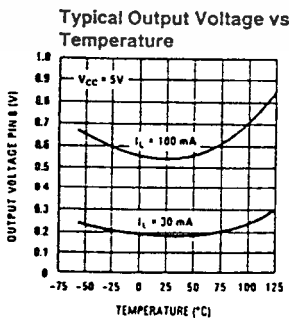
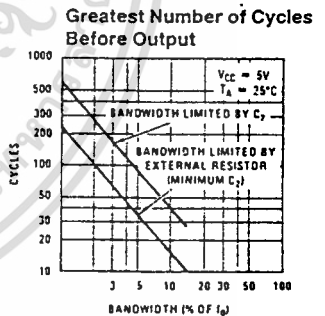
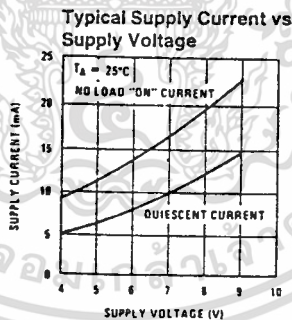
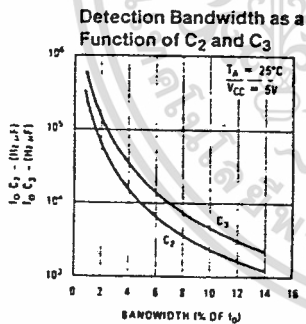
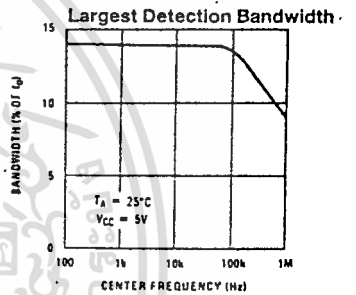
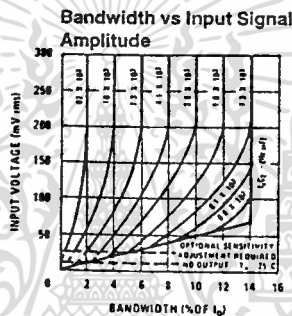
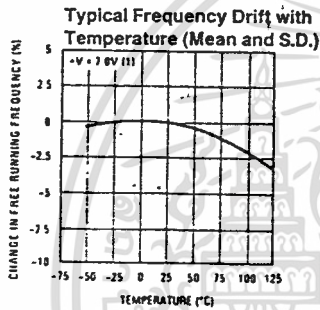
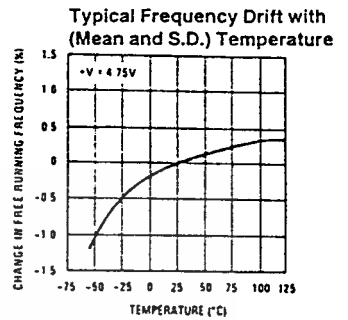
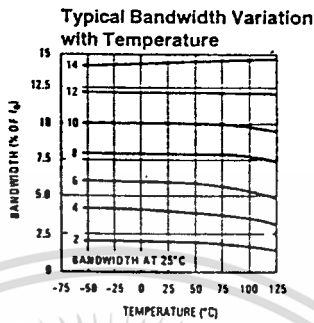
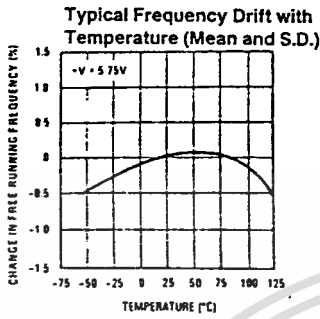
LM567/LM567C

### Schematic Diagram



TL/H/6975-3

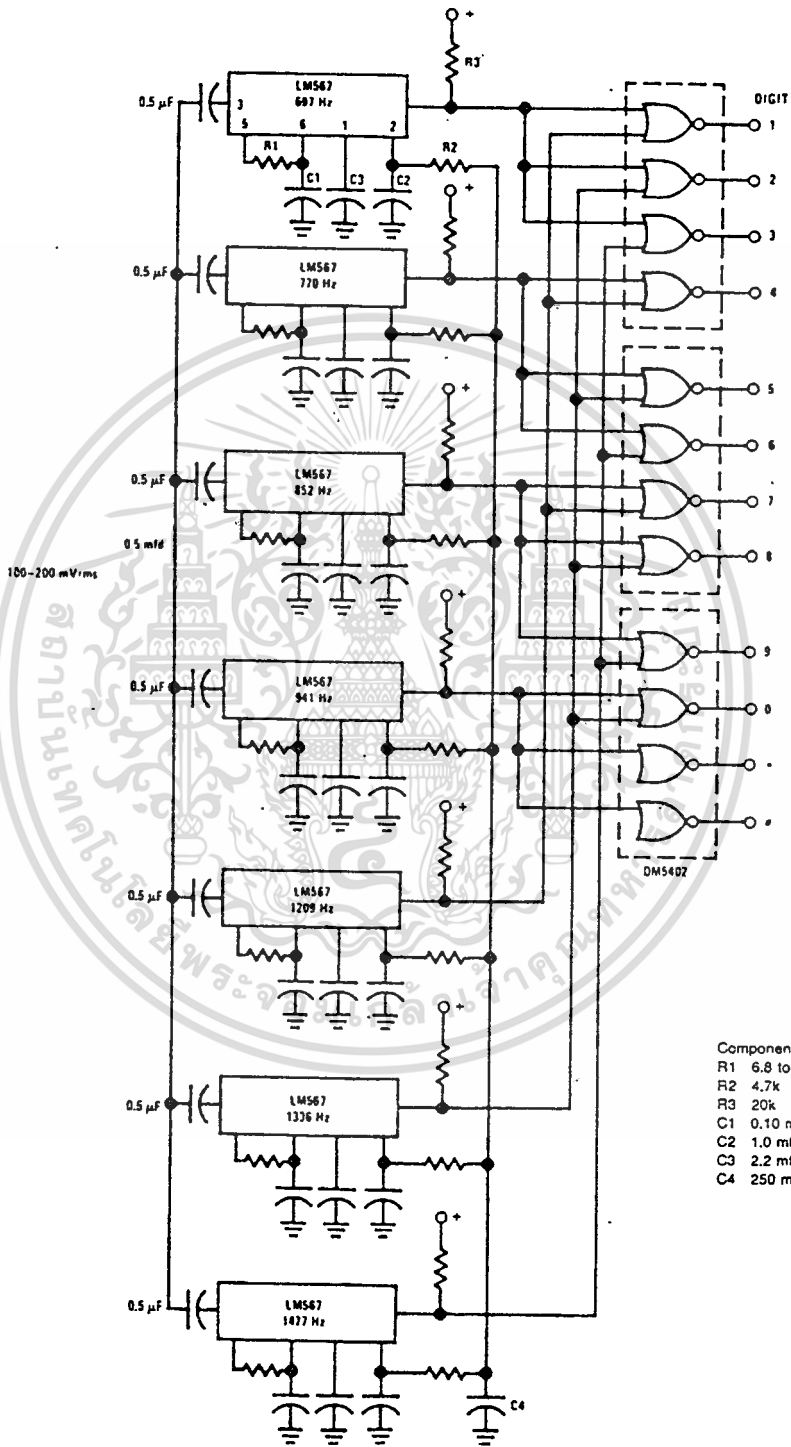
### Typical Performance Characteristics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications

Touch-Tone Decoder

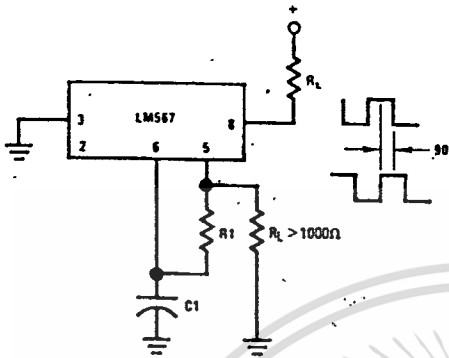


- Component values (typ)
- R1 6.8 to 15k
  - R2 4.7k
  - R3 20k
  - C1 0.10 mfd
  - C2 1.0 mfd 6V
  - C3 2.2 mfd 6V
  - C4 250 mfd 6V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Typical Applications (Continued)

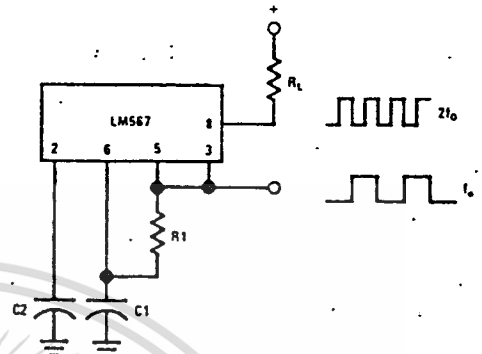
Oscillator with Quadrature Output



Connect Pin 3 to 2.8V to Invert Output

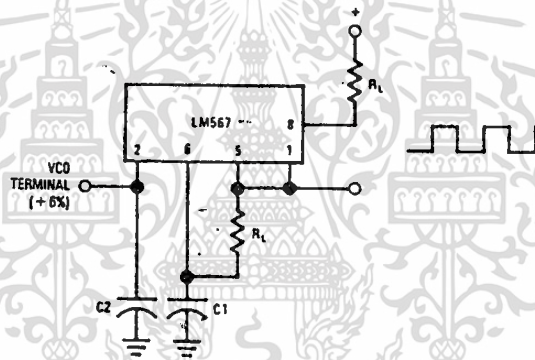
TL/H/6975-6

Oscillator with Double Frequency Output



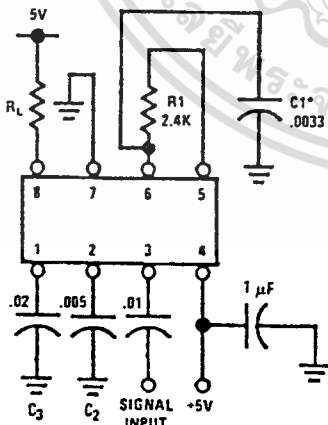
TL/H/6975-7

Precision Oscillator Drive 100 mA Loads



TL/H/6975-8

AC Test Circuit



TL/H/6975-9

$f_0 = 100 \text{ kHz} + 5V$   
 \*Note: Adjust for  $f_0 = 100 \text{ kHz}$ .

Applications Information

The center frequency of the tone decoder is equal to the free running frequency of the VCO. This is given by

$$f_0 \approx \frac{1}{1.1 R_1 C_1}$$

The bandwidth of the filter may be found from the approximation

$$BW = 1070 \sqrt{\frac{V_1}{f_0 C_2}} \text{ in \% of } f_0$$

Where:

$V_1$  = Input voltage (volts rms),  $V_1 \leq 200 \text{ mV}$

$C_2$  = Capacitance at Pin 2 ( $\mu\text{F}$ )

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

พันโท ณรงค์ หมั่นพลศรี

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 2 เมษายน พ.ศ.2499

สถานที่เกิด

จังหวัดหนองคาย

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์

สถานที่สำเร็จการศึกษา

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2522

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- เรื่องการวิเคราะห์และทดสอบวงจร

ขยายสัญญาณแบบทรานส์อิมพีแดนซ์

สำหรับใช้ในเครื่องรับสัญญาณแสง

- เรื่อง ระบบติดตามเป้าหมายด้วยเลเซอร์

รับราชการครู สอนวิทยาศาสตร์ โรงเรียน

ปทุมเทพวิทยาคาร อำเภอเมือง จังหวัด

หนองคาย เมื่อปี พ.ศ. 2522 ถึง พ.ศ.

2524

- นายทหารโครงการร่วมโครงการวิจัย

แบตเตอรี่แห้งหลอดสังกะสีเซลล์ชนิดน้ำยาแข็ง

ของกรมการทหารสื่อสาร กองทัพบก

- นายทหารโครงการร่วม โครงการวิจัยและ

พัฒนาศูนย์เปิดดวงแสงสำหรับปืนกล 40/60

- นายทหารโครงการร่วม โครงการศึกษา

ความเป็นไปได้ในการวิจัยและพัฒนาระบบ

ควบคุมการยิงของรถถังขนาดเบาแบบ

เอ็ม 41

- นายทหารโครงการร่วมโครงการวิจัยและ

พัฒนากระสุนปืนเล็ก สำหรับใช้ยิงกับ พลย.

เอ็ม 16 และ เอชเค 33 ชนิดเกลียว

ลากล้อง 12 นิ้วต่อรอบ

- นายทหารโครงการร่วม โครงการวิจัยและ

พัฒนาเครื่องมือตรวจสอบสภาพเส้นทางการ

เคลื่อนที่

ประสบการณ์การทำงาน

อาชีพปัจจุบัน

รับราชการที่ห้ำร ตำแหน่ง ประจำกองวิจัย

และพัฒนายุทธโธปกรณ์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการ

ทหาร กองบัญชาการทหารสูงสุด

และพัฒนายุทธโธปกรณ์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา

และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่มีการนำไปใช้