บทที่ 3

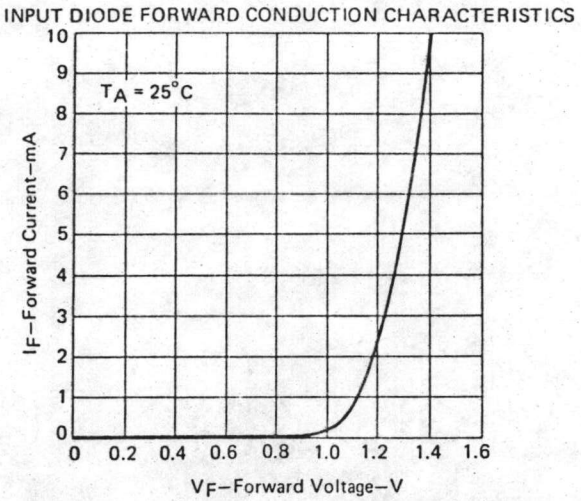
การออกแบบวงจรภาคส่งและภาครับ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงหลักการการออกแบบวงจรภาคส่งและภาครับ รวมถึงการทดลองออกแบบวงจรทั้งภาคส่งและภาครับ เพื่อหาข้อมูลในการออกแบบวงจรภาคส่งและภาครับของระบบรับส่งข้อมูล เชิง เลขที่ใช้แสงอินฟรา เรดส่งผ่านบรรยากาศ

ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.1 ส่วนที่เกี่ยวกับการทำงานทางด้านสัญญาณไฟฟ้าประกอบไปด้วยภาคผสมสัญญาณและแปลงสัญญาณไฟฟ้า เป็นสัญญาณทางแสง โดยที่สัญญาณ เชิง เลขที่ เข้ามานี้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปสัญญาณ เชิง เลขแบบทีทีแอล (TTL) สัญญาณทีทีแอล (TTL) จะ เข้าไปควบคุมความ เข้มของแสงโดยทำการปิด-เปิดลำแสงตามสภาวะสัญญาณทีทีแอลโดยตรง และอีกภาคหนึ่งก็คือ ภาครับและแปลงสัญญาณที่รับมาได้ให้ เป็นสัญญาณ เชิง เลข เพื่อส่งไปใช้งาน ภาคนี้เป็นภาคที่มีความสำคัญอย่างมาก เพราะจะ เป็นส่วนกำหนดประสิทธิภาพของระบบในด้านความไวของการรับและความแน่นอนของสัญญาณที่ได้รับ

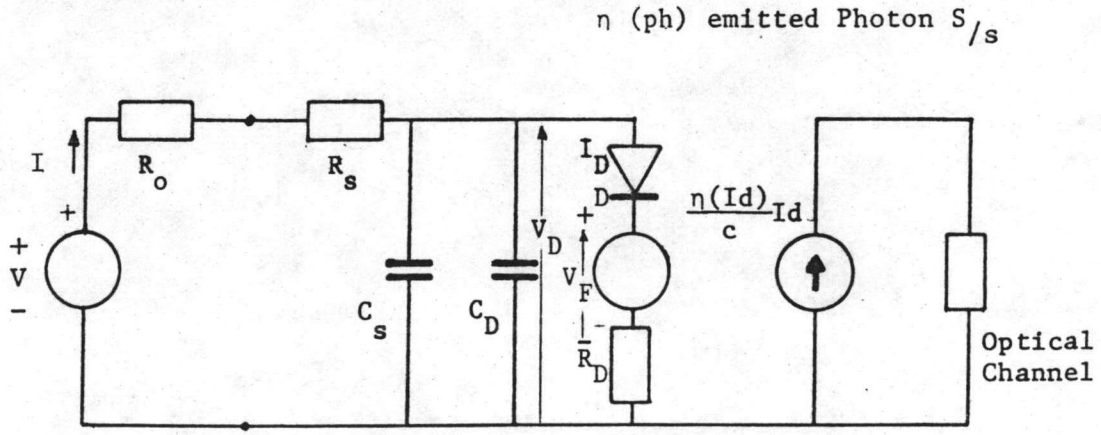
3.1 การออกแบบวงจรภาคส่ง

การนำสารกึ่งตัวนำประ เภท LED มาใช้งานในด้านการสื่อสารนั้น จะสามารถทำการผสมสัญญาณได้โดยตรง ไม่ว่าสัญญาณที่ต้องการจะส่ง เป็นแบบอะนาลอก หรือ เชิง เลข วิธีการที่ใช้ได้ผลดีในปัจจุบันคือการผสมสัญญาณโดยการ เปลี่ยนความ เข้มของแสง (Intensity Modulation) จากคุณสมบัติของไดโอด เอง ขณะที่แรงดันตกคร่อมไดโอด เพิ่มขึ้น เกินจุดนำกระแสของไดโอดแล้ว จะ เกิดกระแสไหลผ่านไดโอด เมื่อ เพิ่มแรงดันขึ้นไปอีก จะก่อให้ เกิดกระแสไหลผ่านไดโอด เพิ่มขึ้นมากกว่าอัตราการ เพิ่มขึ้นของแรงดัน และค่าแรงดันตาม (Forward voltage) ของไดโอดจะมีค่าประมาณคงที่ ที่ค่า ๆ หนึ่ง เมื่ออยู่ในสภาพไบแอสตาม ซึ่งจะ เป็นไปตามลักษณะของแรงดัน-กระแสของไดโอดที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 คุณลักษณะทางด้านแรงดัน - กระแสของไดโอดทั่ว ๆ ไป

จากคุณลักษณะของ LED และ LD ก็ยังคงรักษาลักษณะด้านแรงดัน-กระแสของไดโอด และพบว่าการเกิดแสงหรือการเปล่งพลังงานแสงของ LED หรือ LD จะถูกควบคุมด้วยกระแสที่ป้อนให้ LED หรือ LD และจะมีค่าแรงดันตามตกคร่อมขั้วบวกและลบของ LED คงที่ เมื่อเป็นเช่นนี้สามารถสร้างวงจรสมมูลย์ขึ้นมา เพื่อควบคุมการทำงานของ LED ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลย์ของ LED [15] [16]

โดยที่ R_S = Diode Series resistance

C_S = Depletion - layer capacitance

C_D = Diffusion capacitance

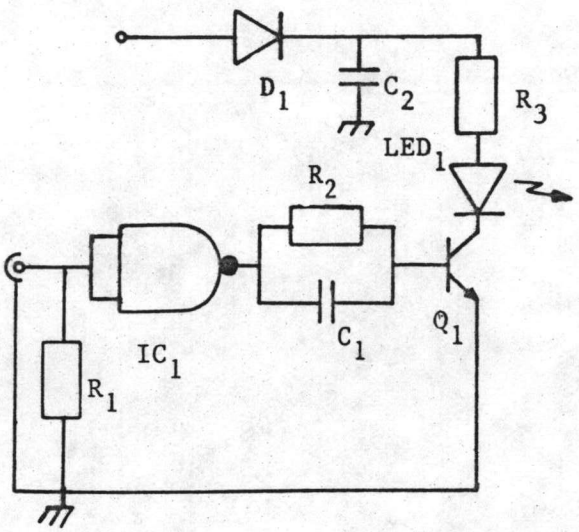
R_D = Junction resistance

V_F = Forward voltage

R_O = Source resistance

V_O = Source voltage

จากวงจรสมมูลย์ของ LED จะเห็นได้ว่าพลังงานแสงที่เกิดขึ้นเป็นอัตราส่วนของกระแสที่ไหลผ่าน LED ขณะเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของกระแส I_D สามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟโดยจะมี R_O เป็นตัวควบคุมกระแสที่ไหลผ่านไดโอด เมื่อเป็นเช่นนี้ ถ้าให้การเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันเป็นการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่ต้องการจะส่งก็จะเกิดผลทำให้เกิดความเข้มของแสงที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณข้อมูลที่ป้อนเข้าไป สำหรับค่า R_S, C_S, C_D, R_D, และV_F เป็นตัวกำหนดความสามารถของ LED ในด้านการตอบสนองความถี่เพราะ R_O, R_S, C_S, และ C_D ทำหน้าที่คล้ายวงจรกรองผ่านต่ำทำให้ตัดความถี่สูงออกไป เมื่อทราบถึงโครงสร้างของ LED ก็ทำให้การออกแบบวงจรภาคส่งมีความสะดวก ในส่วนของงานวิจัยข้อมูลที่จะส่งเป็นข้อมูลเชิงเลข (Digital Signal) แบบทีทีแอลการออกแบบวงจรควบคุมจึงเป็นวงจรประเภทวงจรปิด-เปิด (Switching circuit) โดยให้แรงดันเปลี่ยนตามสัญญาณทีทีแอล คือเมื่อเป็นลอจิก "0" แรงดันจะมีค่าเป็น "0" โวลต์ และในสภาวะลอจิก "1" จะมีระดับแรงดันเท่ากับ 5 โวลต์ หรือในทางตรงข้ามก็เป็นได้โดยให้ R_O เป็นตัวกำหนดกระแสที่ไหลผ่าน LED นับว่าเป็นวงจรที่ไม่ยุ่งยากนัก และง่ายต่อการออกแบบ รูปที่ 3.2 เป็นตัวอย่างวงจรภาคส่งที่ทำการออกแบบไว้สำหรับการทดลอง การออกแบบวงจรได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.1



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างวงจรภาคส่ง

ถ้าจะเปรียบเทียบวงจรจากรูปที่ 3.3 กับวงจรสมมูลย์รูปที่ 3.2 ในส่วนของ IC_1, R_1, R_2, C_1 และ Q_1 ทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับ LED ซึ่งในที่นี้เป็น LED เบอร์ OC-1 โดยที่สัญญาณเข้าคือสัญญาณทีทีแอล เข้าไปผ่านทางเข้าของ IC เบอร์ 74LS00 ซึ่งเป็น Nand Gate ที่มีทางเข้า 2 ขา นำมาต่อร่วมกันจึงทำให้ IC_1 ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ถ้าสัญญาณขาเข้าที่เป็นทีทีแอลอยู่ในสภาวะลอจิก "0" ทางด้านสัญญาณขาออกของ IC_1 จะมีสภาวะเป็นลอจิก "1" มีระดับแรงดันที่ทางออกประมาณ 3.6 โวลต์ IC_1 ก็จะจ่ายไฟให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำให้ Q_1 อยู่ในสภาวะนำกระแสหรือ "ON" และจะมีกระแสไหลผ่าน LED เบอร์ OC-1 ทำให้ LED เปล่งแสงอินฟราเรดออกมา R_2 มีหน้าที่กำหนดระดับกระแสที่ไหลผ่านขาเบสของ Q_1 จะเห็นได้ว่า R_3 ก็คือ R_0 ในวงจรสมมูลย์ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมระดับกระแสที่ไหลผ่าน LED ทำให้เกิดพลังงานแสงตามต้องการ

ในทำนองกลับกัน เมื่อสัญญาณขาเข้ามีสภาวะเป็นลอจิก "1" การทำงานทุกอย่างจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม IC_1 จะมีสัญญาณขาออกเป็น "0" Q_1 จะไม่มีกระแสมาเลี้ยงที่ขาเบส Q_1

จะหยุดสภาวะนำกระแสและก็จะไม่มีกระแสไหลผ่าน LED ทำให้ LED หยุดการเปล่งแสง

และเพื่อให้วงจรภาคส่งทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในด้านการออกแบบวงจรจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัญหาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยเพิ่มเติมอุปกรณ์ที่จำเป็นอื่น ๆ อีก เช่น

R_1 จะทำหน้าที่กำหนดสภาวะอินพุทให้อยู่ในสภาวะลอจิก "0" เมื่อไม่มีการป้อนสัญญาณขาเข้า

C_1 มีไว้ชดเชยสเตรย์คาพาซิแตนซ์ ระหว่างขาเบสและขาอีมิเตอร์ ของ Q_1 และในลายปริ้นท์

C_2 เป็นตัวเก็บประจุลัดผ่านเพื่อไว้กรองระลอกคลื่นจากแหล่งจ่ายไฟ และช่วยให้สามารถจ่ายกระแสไฟให้ LED ในสภาวะการเริ่มเปล่งแสงได้มาก

D_1 มีไว้ป้องกันการต่อแหล่งจ่ายไฟผิดขั้ว

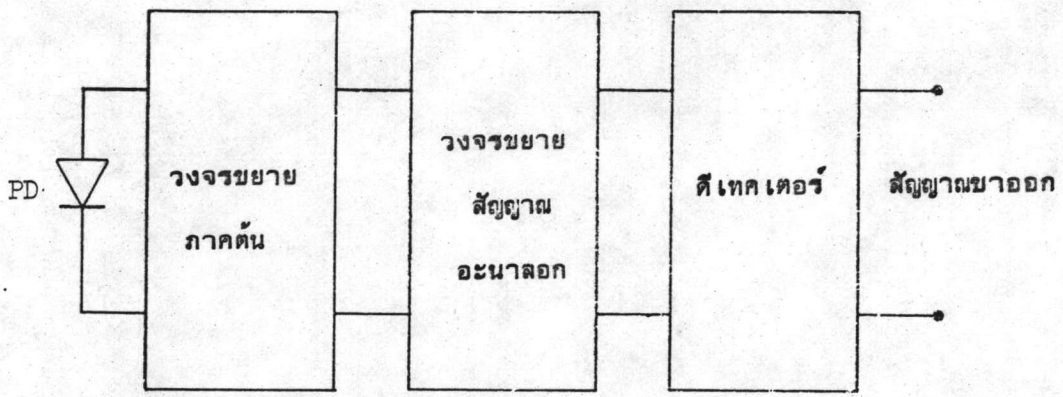
สำหรับการออกแบบดังรูปที่ 3.3 นี้ เพื่อสะดวกในเวลาทำการติดตั้งและทดลอง จึงได้กำหนดให้ LED เปล่งแสงในสภาวะที่ไม่ได้ป้อนสัญญาณขาเข้า

จากรายละเอียดคุณสมบัติของ LED เบอร์ OC-1 ถ้าให้กระแสไหลผ่านประมาณ 50 mA จะได้พลังงานแสงออกมาประมาณ 4 mW ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบให้มีกระแสไหลผ่าน LED ประมาณ 50 mA และจากการทดลองพบว่าวงจรนี้สามารถขับ LED เบอร์ OC-1 ให้ทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่า 2 MHz จึงนับว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง

3.2 การออกแบบวงจรภาครับ

การรับสัญญาณนับได้ว่ามีส่วนสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะสัญญาณที่รับได้นั้นเป็นสัญญาณที่อ่อนมาก และขณะเดียวกันความต้องการด้านประสิทธิภาพที่จะต้องครอบคลุมถึงความสามารถในการตอบสนองความถี่ได้สูง ไม่ทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนและสามารถขยายสัญญาณที่มีการรบกวนสูงได้ดี ดังนั้นในด้านการรับสัญญาณจึงมีจุดที่จะต้องคำนึงถึงอยู่หลายด้าน การรับสัญญาณจะใช้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท PIN PD ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วทำการขยายสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้ง การใช้ PIN PD มีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ต้องการแหล่งจ่ายไฟต่ำประมาณ 15 โวลต์ เป็นตัวรับแสงที่ราคาถูกหาได้ง่าย การตอบสนองความถี่ดีและสามารถใช้ได้ดีในย่านอินฟราเรด ประกอบด้วยความไวในการตรวจรับแสงอยู่ในขั้นดีพอสมควร และข้อดีของ PIN PD ในด้านเสถียรภาพ

มีสัญญาณรบกวนต่ำ ในกรณีที่ได้รับแสงมาก PIN PD จะไม่เสียหายถึงแม้จะให้รับแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรงก็ตามสนามแม่เหล็กนับว่ามีผลต่ออุปกรณ์ประเภทอื่น แต่จะไม่กระทบกระเทือนต่อ PIN PD ความเที่ยงตรงในการทำงานมีสูง แต่อย่างไรก็ดีการทำงานของ PIN PD อย่างเดียวยังไม่ทำให้ภาครับมีความสมบูรณ์ เพราะจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องขยายสัญญาณจาก PIN PD นี้ ให้มีขนาดพอที่จะทำการเปลี่ยนสัญญาณทีทีแอลที่เป็นข้อมูลที่ถูกต้องมาใช้งานให้ได้อีกด้วย ดังนั้นวงจรภาครับจึงประกอบไปด้วยวงจรย่อยตามไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 ดังนี้



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของวงจรภาครับ

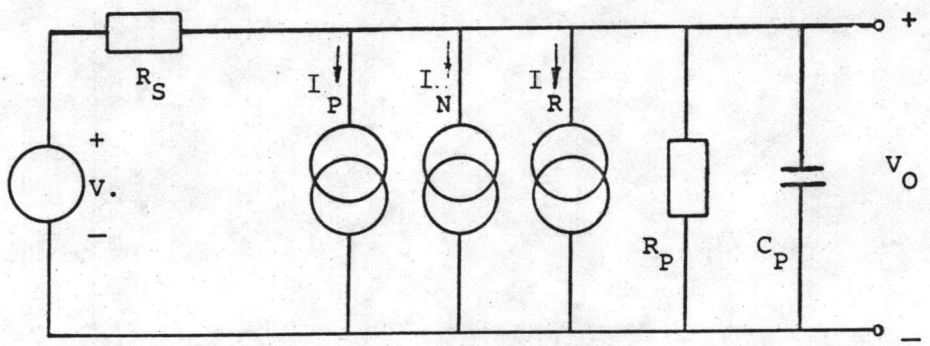
จากไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 ดังกล่าวพอจะเห็นความสำคัญของภาครับได้เป็นอย่างดี ดังนั้น การพิจารณาถึงการออกแบบในแต่ละภาคจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในที่นี้จะเริ่มจาก PIN PD ก่อนเป็นอันดับแรก

3.2.1 การทดลองวัดคุณสมบัติและการพิจารณาเลือกใช้โฟโตไดโอด

นับจากเริ่มต้นวัตถุประสงค์การดำเนินการวิจัยตั้งสมมุติฐานว่าจะต้องทำการส่งข้อมูล

ที่ความเร็วประมาณ 2 Mb/s ดังนั้นความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรทุกภาค จะต้องมีแบนด์วิดท์ไม่น้อยกว่า 2 MHz ดังนั้นการวัดคุณสมบัติของโฟโตไดโอดจึงได้เน้นในจุดนี้

ถ้าพิจารณาถึงคุณลักษณะของ PIN PD แล้ว การศึกษาถึงวงจรสมมูลย์ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของ PD ได้อย่างดี รูปที่ 3.5 เป็นรูปวงจรสมมูลย์ของ PIN PD



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลย์ของ PIN PD

โดยที่ I_P คือกระแสที่เกิดจากการรับแสง

I_N คือกระแสที่เกิดจากสัญญาณรบกวน

I_R คือกระแสที่ไหลเนื่องจากการให้ไบแอสแบบ Reverse (Dark Current)

R_P คือ Shunt Resistance

C_P คือ Shunt Capacitance

จะได้

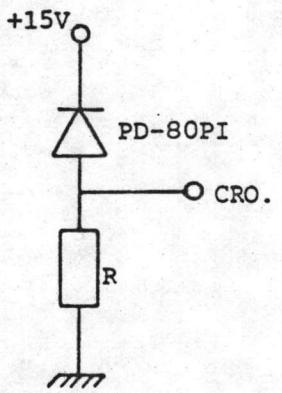
ความถี่ตัด (Cut off Frequency) $f_C = \frac{1}{2\pi R_S C_P}$ (3.1)

ถ้า $R_P >> R_S$

ในส่วนที่สำคัญที่สุดก็คือ ความถี่ตัด f_C จะเห็นได้ว่า จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ตัว คือ ค่า R_S และ C_P โดยที่ C_P เป็นคุณสมบัติของตัว PIN PD เอง แต่สำหรับ R_S เป็นค่าที่สามารถควบคุมได้ จากนี้ได้ทำการทดลองโดยการทดสอบ PIN PD 2 เบอร์ คือ PD-80PI และ TIL 100 ซึ่งเป็น PIN ที่ราคาถูกและหาซื้อได้ตามท้องตลาด

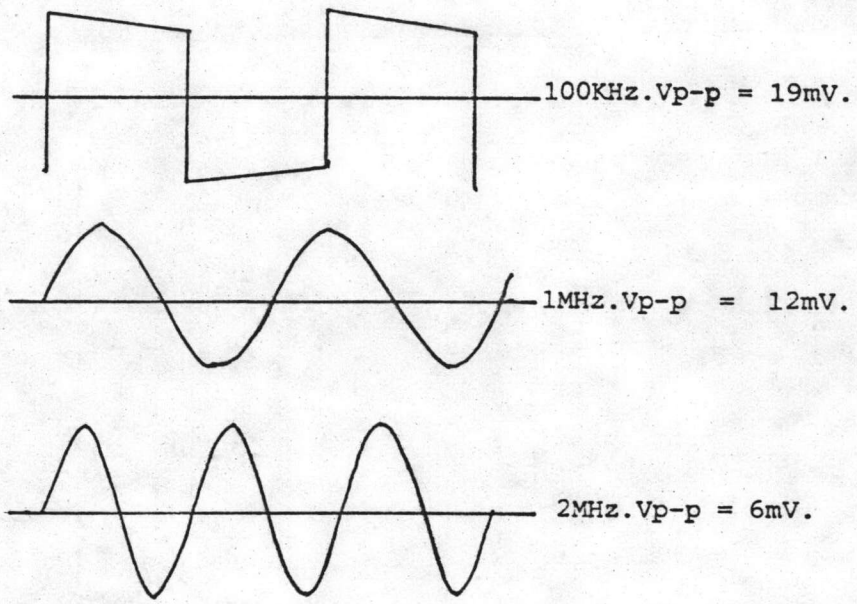
3.2.1.1 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของ PIN PD เบอร์ PD-80PI

ในการทดลองได้ทำการต่อวงจรตามรูปที่ 3.6 โดยให้โฟโตไดโอดรับสัญญาณแสงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากแหล่งกำเนิดแสงที่ตอบสนองความถี่ได้สูงกว่า 2 MHz แล้วทำการวัดขนาดเอาท์พุทจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในรูปแรงดันตกคร่อมความต้านทาน 500 โอห์ม ทำการวัดโดยการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณแสงที่ส่งเข้ามา



รูปที่ 3.6 วงจรทดสอบคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

จากรายละเอียดคุณสมบัติของ PD-80PI พบว่าที่การป้อนไบแอสกลับทาง (Reverse Bias) 15 V จะให้ Terminal Capacitance (C_P) ประมาณ 55 PF จากสมการที่ (3.1) พบว่าความถี่ตัดของ PD-80PI ที่ใช้ R_S=500 โอห์ม จะมีค่าประมาณ 5.79 MHz ค่าตัวเลขนี้เป็นค่าทางทฤษฎี แต่จากการทดลองพบว่า การตอบสนองความถี่ของ PD-80PI เป็นไปตามรูปที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่สูงขึ้นการตอบสนองความถี่จะไม่ดี จากคลื่นรูปสี่เหลี่ยมจะค่อย ๆ กลายเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) และขนาดก็เล็กลงจนเหลือประมาณ 1/3 เท่าของที่ความถี่ต่ำ เมื่อวัดที่ความถี่ 2 MHz

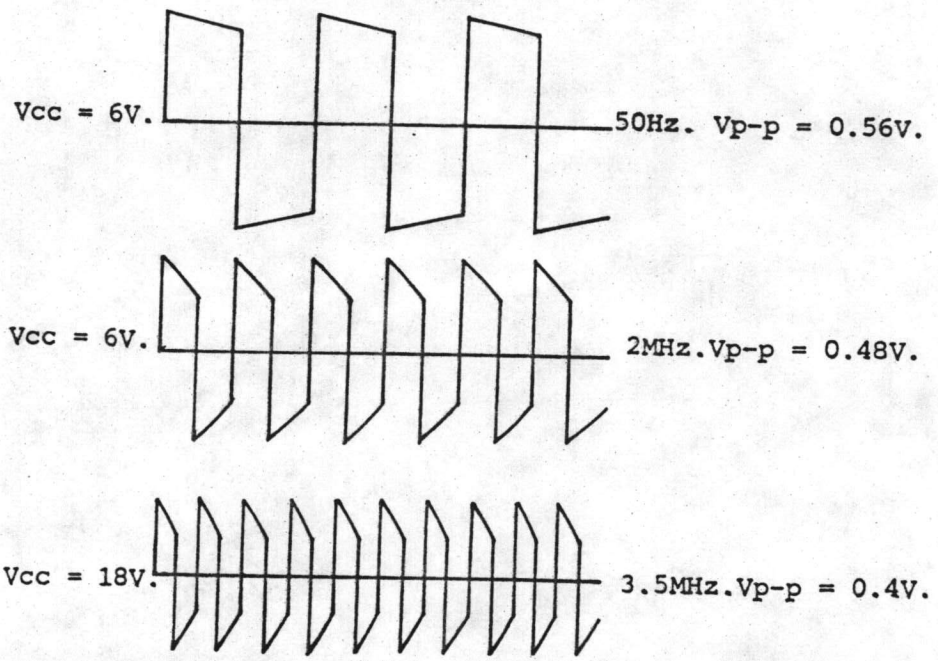


รูปที่ 3.7 การตอบสนองความถี่ของ PD-80PI

3.2.1.2 ผลการทดลองวัดคุณสมบัติของ PIN PD เบอร์ TIL 100

การทดลองวัดคุณสมบัติของ TIL 100 กระทำโดยการต่อวงจรเช่นเดียวกันกับกรณี PD-80PI เพียงแต่เปลี่ยนค่าแรงดันที่ป้อนเป็น 6 V และเปลี่ยนค่า R เป็น 470 โอห์ม จากการทดลองวัดคุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ของ TIL 100 ได้ผลแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 ในทำนองเดียวกัน จากสมการ (3.1) และจากรายละเอียดคุณสมบัติของ TIL 100 พบว่าค่า C_p มีค่าประมาณ 25 pF จะได้ความถี่ตัดประมาณ 13.55 MHz จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าที่ความถี่ 2 MHz รูปคลื่นที่ได้ยังมีส่วนของสัญญาณสี่เหลี่ยมอยู่มาก และขนาดลดลงไปประมาณ 10% แต่ถ้าเพิ่มแรงดันไบแอสกลับทางขึ้นไปอีกจนถึง 18 V จะได้ค่า C_p ลดลงเหลือเพียง 15 pF หรือ f_C ประมาณ 22.58 MHz ซึ่งนับว่าสูงมากพอที่จะนำมาใช้งานได้อย่างดี เพราะพิจารณาจากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าที่ความถี่ 3.5 MHz สัญญาณที่ไบแอสด้วย 18 V ยังให้สภาพเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่ดีอยู่ จึงนับว่า

เหมาะแก่การนำมาใช้งาน เป็นอย่างมาก นั่นหมายความว่าสามารถนำไฟโตไดโอดเบอร์นี้มาใช้ในการรับสัญญาณภาพวีดีโอที่ส่งมาในรูปสัญญาณแสงได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะได้ใช้ไฟโตไดโอดเบอร์ TIL 100 ในการทำงานต่อไป



รูปที่ 3.8 การตอบสนองความถี่ของ TIL 100

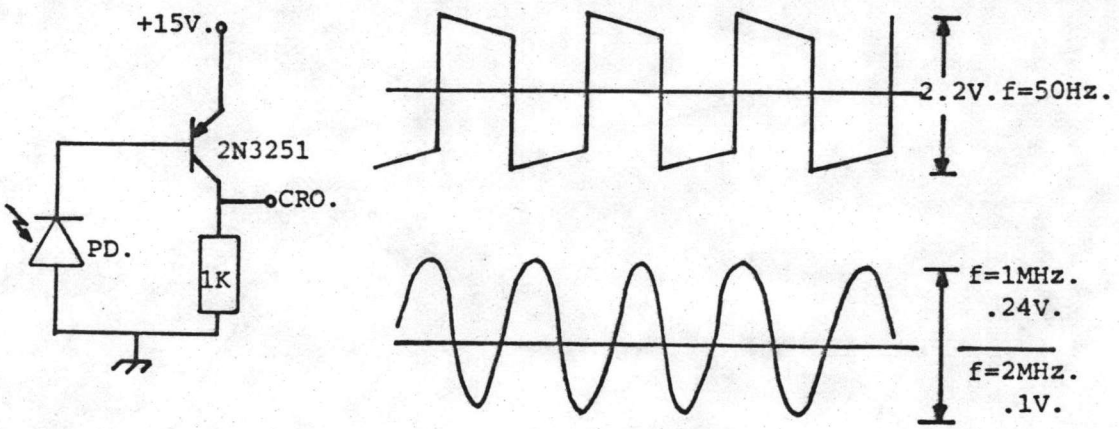
3.2.2 การออกแบบวงจรภาคขยายสัญญาณจากไฟโตไดโอด

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสที่มาจากไฟโตไดโอดแล้วทำการขยายให้เป็นสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้า เพื่อส่งไปให้ภาคดีเทคเตอร์เปลี่ยนเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเช่นเดิม และเนื่องจากวงจรส่วนนี้ เป็นการขยายสัญญาณในลักษณะของสัญญาณอะนาลอก จึงอาจเรียกวงจรส่วนนี้ได้ว่าเป็นวงจรขยายสัญญาณอะนาลอก การออกแบบวงจรขยายสัญญาณจากไฟโตไดโอดมีวิธีกระทำได้หลายวิธี เช่นอาจจะใช้ทรานซิสเตอร์หรือใช้ออปแอมป์เป็นต้น ในที่นี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลองของการใช้วงจรทรานซิสเตอร์และออปแอมป์ ตามลำดับ

3.2.2.1 การขยายสัญญาณจากโฟโตไดโอดโดยใช้ทรานซิสเตอร์

สำหรับการทดลองในส่วนนี้เริ่มต้นโดยการต่อวงจรขยายจากทรานซิสเตอร์โดยตรง ดังรูปที่ 3.9 ตัวโฟโตไดโอดจะต่อแบบกลับทางระหว่างขาเบสกับคอลเลกเตอร์

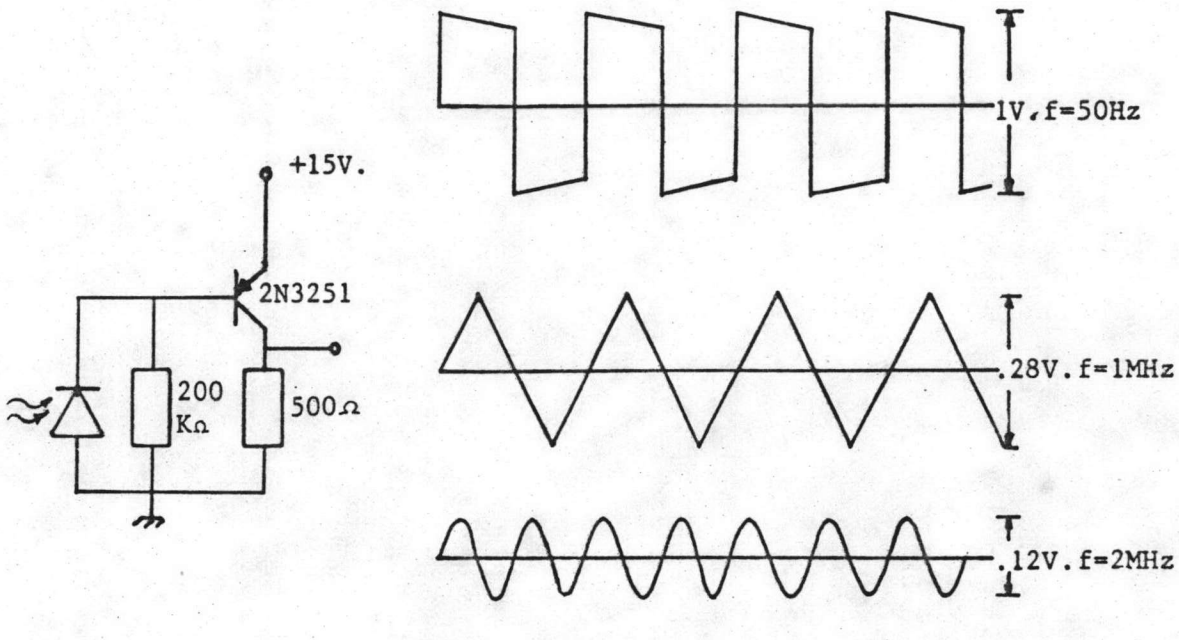
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 วงจรขยายกระแสจากโฟโตไดโอดโดยตรง

ในวงจรนี้ ทรานซิสเตอร์จะถูกไบแอสด้วยกระแสประมาณเท่ากับกระแสย้อน (Reverse Current) ของ PIN PD จากคุณสมบัติของวงจรจะได้อัตราขยายประมาณ R/r_{BE} จากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ $r_{BE} = \frac{\beta_o}{g_m} \simeq \frac{kT}{g} / I_B$ ดังนั้นค่า r_{BE} จึงมีค่าสูง แต่อย่างไรก็ดีอัตราขยายของวงจรนี้ก็ยังมีค่าสูง และถ้าพิจารณาจากสมการ (3.1) ค่า R_S ในสมการนี้ก็คือค่า r_{BE} ซึ่งมีค่าสูงทำให้ความถี่ตัดมีค่าต่ำ ทำให้แบนด์วิดท์ต่ำตามไปด้วย

ถ้าหากลดค่า r_{BE} ลงโดยการไบแอสให้มีกระแสเบสสูงขึ้น ดังรูปที่ 3.10

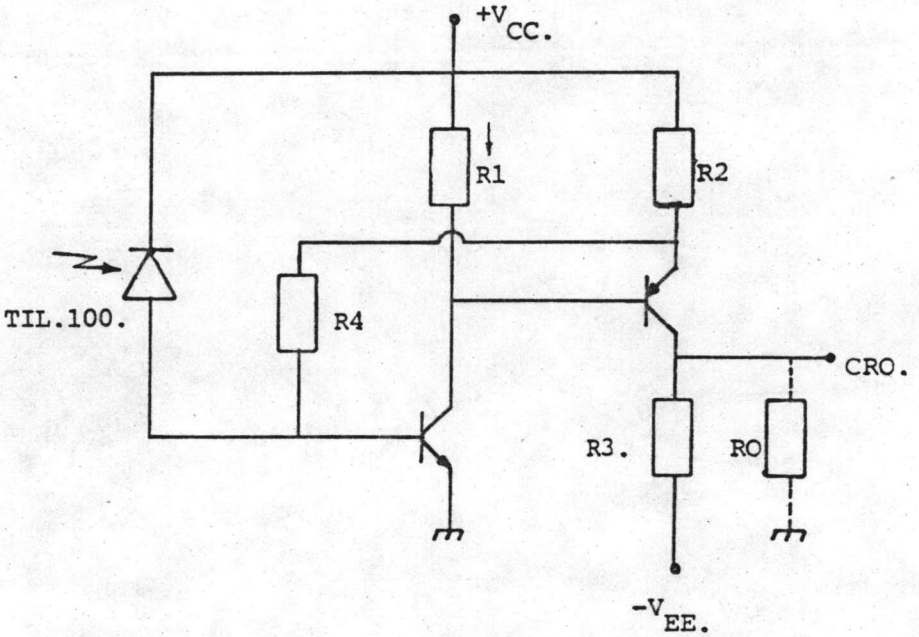


รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณจากโฟโตไดโอดโดยใช้ทรานซิสเตอร์ในย่านแอคตีฟ

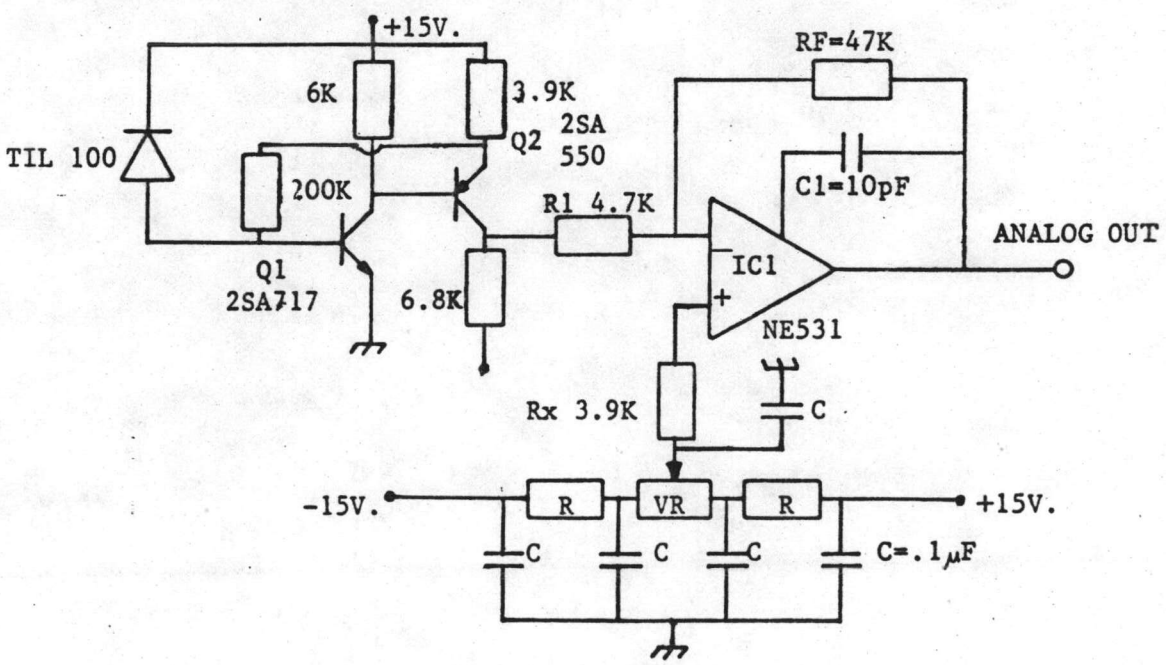
จะเห็นได้ว่าวิธีนี้จะทำให้ค่า r_{BE} ลดลง ทำให้แบนด์วิดท์สูงขึ้น แต่ขณะเดียวกัน การลด R_C ลงก็ทำให้อัตราการขยายลดลง แต่การใช้วงจรขยายวิธีนี้จะสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนที่ R_C โดยไม่ได้ประโยชน์เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากอัตราการขยายของวงจร

เมื่อมีปัญหาเช่นนี้การออกแบบวงจรต่อไปก็คือ การพิจารณาวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณในรูปกระแสให้เป็นสัญญาณทางด้านแรงดันได้ดี มีอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้าต่ำ และมีอัตราการขยายสูง ๆ และขณะเดียวกันจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีสัญญาณรบกวนต่ำ ๆ จึงได้ทำการออกแบบวงจรดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวมาต่อกันในรูปการทำงานแบบ Common Emitter to Common Emitter โดยมีการป้อนกลับแบบ Series Output - Parallel Input จากการวิเคราะห์วงจรในภาคผนวก (ก.2) จะพบว่าวงจรนี้ให้อัตราขยายกระแสเป็นแรงดันสูง

ถึง 109 KΩ แต่ถ้านำมาใช้งานยังไม่เพียงพอ เพราะกระแสที่ได้จากโฟโตไดโอดมีค่าอยู่ในหลัก ไมโครแอมป์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณที่ได้นี้อีก โดยแสดงไว้ในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 วงจรขยายกระแสจากโฟโตไดโอดเป็นแรงดันโดยใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

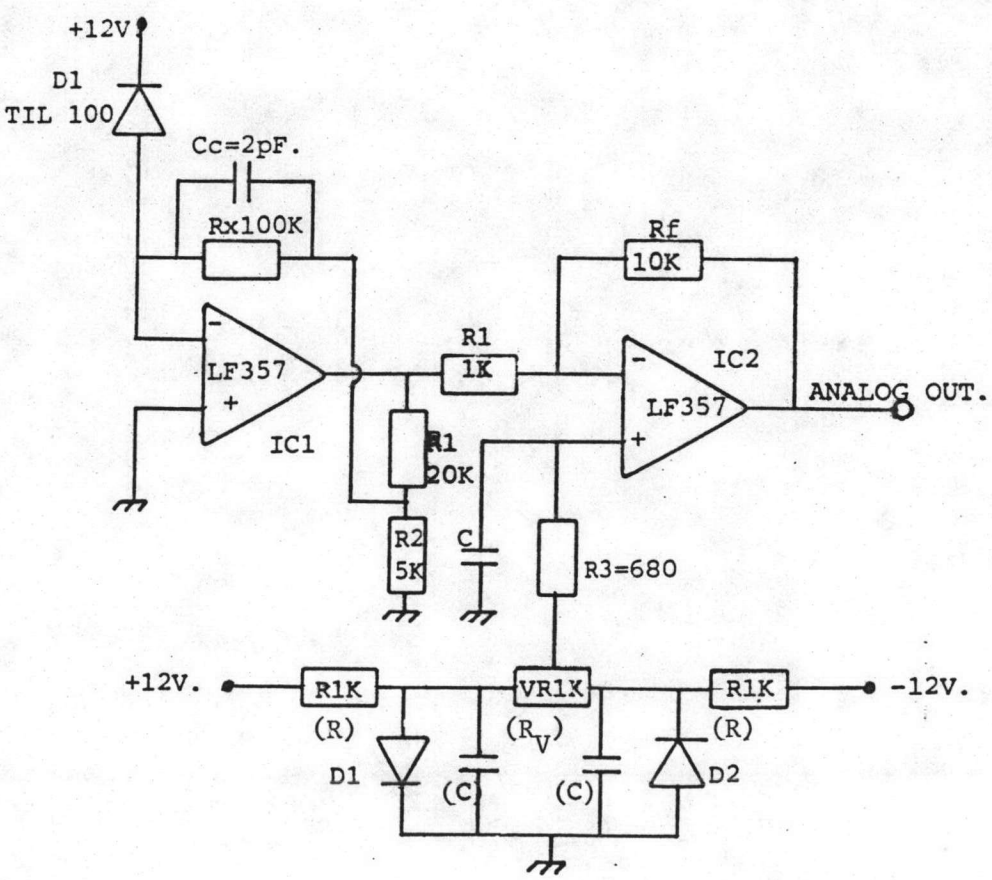


รูปที่ 3.12 วงจรที่ใช้ออปแอมป์ขยายเพิ่ม

การเพิ่มวงจรขยายโดยใช้ออปแอมป์เข้ามาช่วยก็เพื่อเพิ่มอัตราการขยายของวงจรอีกประมาณ 10 เท่า เหตุผลที่ใช้ออปแอมป์ก็เพราะง่ายและสะดวกต่อการใช้งานและสามารถกำหนดอัตราการขยายได้ง่าย แต่ผลจากการทดลองยังพบว่าวงจรตามรูปที่ 3.12 ยังไม่สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงพอ คือมีแบนด์วิดท์ประมาณ 500 kHz และประกอบกับการใช้ทรานซิสเตอร์ทำให้มีอัตราสัญญาณรบกวนสูง

3.2.2.2 การขยายสัญญาณจากโฟโตไดโอดโดยใช้ออปแอมป์

การที่จะนำออปแอมป์มาใช้งานนั้น นับว่าเป็นเรื่องที่จะต้องพิจารณาอย่างมาก ๆ เพราะความเป็นจริงออปแอมป์ง่ายต่อการใช้งาน แต่คุณสมบัติในการตอบสนองความถี่ไม่สูงเท่าที่ควร ออปแอมป์โดยปกติจะมีค่า Unity gain bandwidth product อยู่ในค่าต่ำกว่า 1 MHz ดังนั้นการใช้ที่ 2 MHz จึงแทบจะเป็นไปไม่ได้ แต่ก็พบว่าถ้าใช้ออปแอมป์เบอร์ LF357 ซึ่งเป็นออปแอมป์ที่มีโครงสร้างเป็น BiFET ทำให้มีสัญญาณรบกวนต่ำกว่าการใช้ออปแอมป์ที่มีโครงสร้างเป็น Bipolar Transistor และสามารถให้ Unity gain bandwidth มีค่าเท่ากับ 20 MHz ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองออกแบบได้วงจรดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรขยายสัญญาณจากโฟโตไดโอดโดยใช้ออปแอมป์

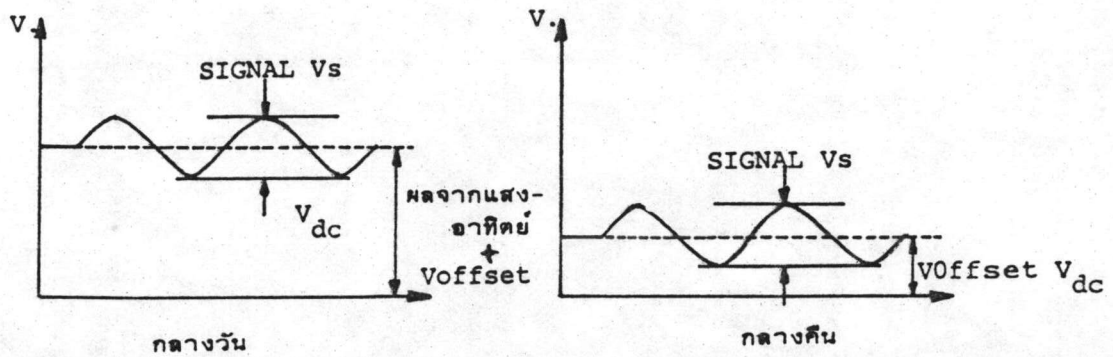
การออกแบบได้แบ่งการทำงานของวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือในส่วนแรกจะใช้ออปแอมป์ 1 ตัว ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันด้วยอัตราขยาย -500 kΩ และส่วนหลังจะใช้ออปแอมป์อีก 1 ตัว ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันด้วยอัตรา -10 เท่า เมื่อรวมอัตราขยายของวงจรทั้งหมดจะได้อัตราขยายประมาณ 5 MΩ หรือเปรียบเทียบได้ว่าถ้ามีกระแสไหลในโฟโตไดโอด 1 μA จะทำให้เกิดเอาท์พุทที่เป็นสัญญาณอะนาลอกมีค่า 5 โวลต์ ซึ่งนับว่าสูงพอสำหรับการนำมาใช้งาน

เนื่องจากจะต้องปรับระดับแรงดันที่เอาท์พุทให้มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ในสภาวะที่ไม่ได้รับสัญญาณ ดังนั้นจึงได้เพิ่มอุปกรณ์เข้ามาช่วยบังคับให้เอาท์พุทมีค่าศูนย์โวลต์ ซึ่งประกอบไปด้วย D_1, D_2, R และ R_V รวมทั้ง C ทั้ง 2 ตัว การใช้ D_1 และ D_2 เพื่อให้ระดับแรงดันที่จะใช้ในการปรับมีค่าไม่เกิน ± 0.6 V โดยที่ R และ C ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านต่ำและรวมทั้งกำหนดค่ากระแสที่ไหลผ่าน R_V ไม่ให้เกิน 20 mA

เมื่อทำการวัดคุณสมบัติของวงจรโดยวัดความสามารถในการรับแสงและการตอบสนองความถี่ จากการทดลองพบว่า ถ้ามีอินพุทเข้ามา 1 ไมโครวัตต์ จะทำให้เกิดเอาท์พุทขนาด 3 โวลต์ จากข้างต้นถ้าทราบอัตราการขยายของวงจรมีค่า 5 MΩ จะได้ความสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 μA/μW และวัดหาความสามารถในการตอบสนองความถี่ปรากฏว่าได้แบนด์วิดท์ที่ 6 dB เป็น 1.3 MHz นับเป็นค่าที่พอจะนำมาใช้งานได้

3.2.3 <u>การออกแบบและทดลองวงจรภาคเปลี่ยนสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล</u>

จากการออกแบบภาครับในส่วนแรกได้กำหนดให้การขยายเป็นแบบ DC-Amplifier คือจะสามารถขยายสัญญาณได้ตั้งแต่ความถี่ที่เป็นศูนย์หรือระดับแรงดันดีซี จนถึงความถี่ที่ 2 MHz เมื่อเป็นเช่นนี้ภาครับจะประสบกับปัญหาการรับแสงเพราะจะถูกรบกวนด้วยแสงอาทิตย์หรือแสงจากบรรยากาศรอบ ๆ เช่น ดวงไฟ เหล่านี้เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในสภาพปกติ จะมีแสงที่มีความเข้มอยู่ค่า ๆ หนึ่งเสมอ เมื่อแสงที่มีความเข้มขนาดนี้ไปตกบนภาครับจะทำให้เกิดแรงดันดีซีขึ้นค่า ๆ หนึ่งเสมอ และระดับแรงดันจะเปลี่ยนไปตามความสว่างของบรรยากาศรอบ ๆ เช่น กลางวันจะมีค่ามาก กลางคืนจะมีค่าน้อย ถ้าหากระบบภาครับได้รับสัญญาณที่ส่งมาจากภาคส่ง สัญญาณที่รับได้จะเกิดขึ้นรอบ ๆ ค่าแรงดันดังกล่าวนี้ ดังรูปที่ 3.14

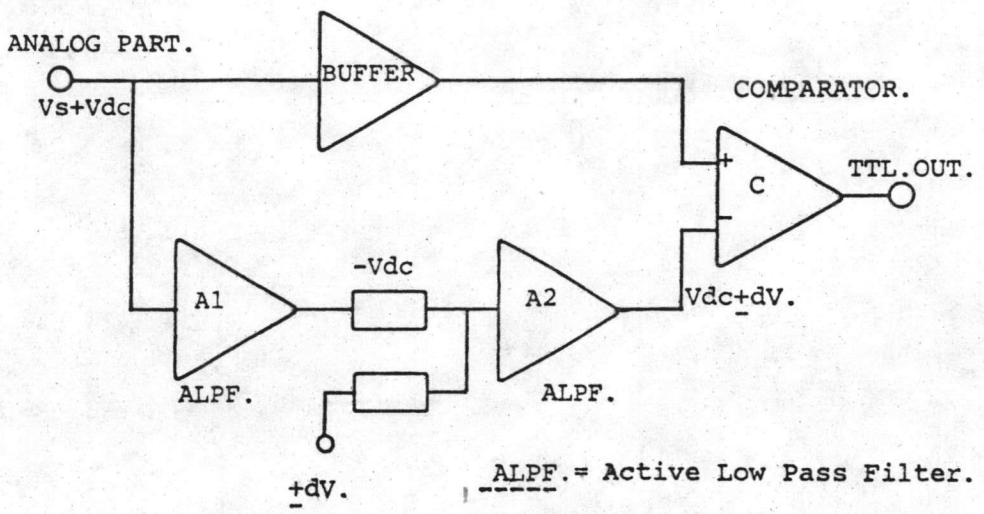


รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณภาคอะนาลอก เนื่องจากสภาพแวดล้อม

จากรูปที่ 3.13 ระดับสัญญาณ V_{DC} เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความสว่างของบรรยากาศในขณะที่ส่งสัญญาณ และ V_S เป็นสัญญาณที่รับได้ การออกแบบภาคนี้อาจทำได้ 2 วิธีคือ การใช้วงจรกรองผ่านสูงเพื่อให้เฉพาะสัญญาณที่ส่งผ่านไปได้ หรือการสร้างวงจรที่สามารถปรับตัวเองให้เปลี่ยนตามสภาวะแสงในบรรยากาศ ซึ่งทั้งนี้การเลือกใช้จะต้องขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสัญญาณที่ใช้ เพราะถ้าทำการรับส่งข้อมูลที่มีระบบฐานความถี่ (Clock)ที่แน่นอน เช่น การส่งข้อมูลแบบ Biphase ที่ 2 Mb/s การส่งจะทำการส่งโดยใช้ความถี่อ้างอิงหรือฐานความถี่เป็น 2 MHz แล้วผสมข้อมูลที่เป็นหนึ่งหรือศูนย์เข้ากับความถี่อ้างอิง วิธีการนี้ถ้าใช้วิธีการแบบที่หนึ่งจะช่วยกำจัดสัญญาณรบกวนไปได้มาก แต่ถ้าในระบบไม่มีระบบฐานความถี่ อาจมีการส่งสัญญาณตั้งแต่แบบส่งที่ละพัลส์ (Single Pulse) และความถี่ในการส่งอาจเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0-2 Mb/s วิธีการแบบที่ 2 จะสามารถรับการเปลี่ยนแปลงได้ดีกว่า เพราะวิธีการที่หนึ่งจะตัดความถี่ต่ำ ๆ ออกไปทำให้การส่งข้อมูลที่ความเร็วต่ำ ๆ ไม่อาจตรวจรับเป็นสัญญาณออกมาได้

ในที่นี้จะได้กล่าวถึงวงจรแบบที่ 2 เพื่อจะได้เห็นสภาพการเปลี่ยนแปลงและการเกิดสัญญาณได้เด่นชัด โดยการออกแบบตามโครงสร้างในรูปที่ 3.15

I 10333188



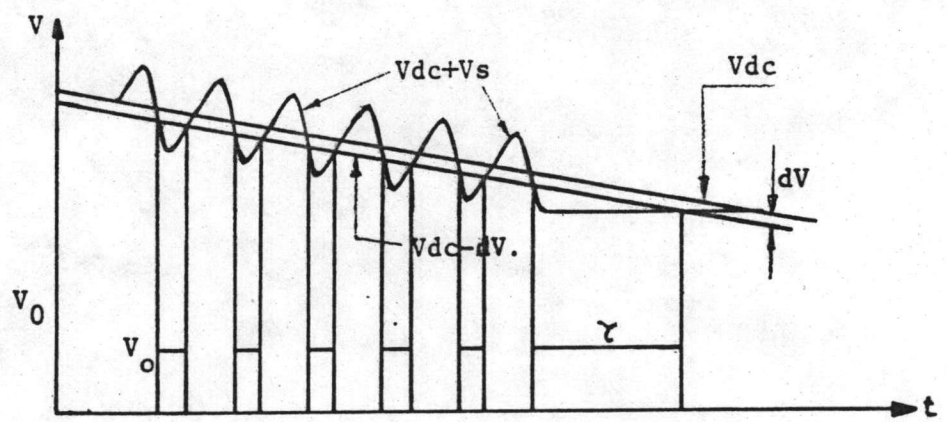
รูปที่ 3.15 โครงสร้างของวงจรภาคดีเทคเตอร์

หลักการการทำงานก็คือ เมื่อรับสัญญาณเข้ามาจะประกอบไปด้วย $V_{DC} + V_S$ เมื่อ เป็นเช่นนี้ต้องทำการแยก V_{DC} ออกโดยการผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำจะได้ V_{DC} หลังจากนั้นจะนำ V_{DC} ที่แยกมา เป็นค่าแรงดันอ้างอิงป้อน เข้าไปยังภาค เปรียบ เทียบ (Comparator) ตัว เปรียบ เทียบระดับสัญญาณจะทำการ เปรียบ เทียบสัญญาณ $V_{DC} + V_S$ กับ V_{DC} เมื่อ $V_{DC} + V_S$ เป็นบวกมากกว่า V_{DC} เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ค่าหนึ่ง (dV) ตัว เปรียบ เทียบก็จะให้ เอาท์พุทออกมา เป็นลอจิก "1" ถ้า $V_{DC} + V_S$ ตกลงมาน้อยกว่า V_{DC} เกินกว่า dV ตัว เปรียบ เทียบก็จะให้ เอาท์พุทออกมา เป็นลอจิก "0"จะเห็นได้ว่าไม่ว่า V_{DC} จะ เปลี่ยนไป เป็น เท่าไรก็ตามการ เปรียบ เทียบก็ยังคงให้ผล เช่น เดิม

สำหรับวงจรในรูปที่ 3.15 จะแตกต่างหลักการข้างต้น เล็กน้อย เพราะมีการ เพิ่ม เติมวงจรที่ช่วยให้การทำงานแม่นยำขึ้น ซึ่งมีการทำงานดังนี้ $-A_1$, A_2 เป็น Active Low Pass Filter ทำหน้าที่ผ่าน เฉพาะสัญญาณที่ เป็นดีซี เท่านั้น การ เลือกใช้วงจรแบบแอกทีฟ เพราะออปแอมป์มีอิมพีแดนซ์ขา เข้าสูงทำให้ไม่ เกิด เป็นภาระกับสัญญาณ ระดับและรูปร่างของสัญญาณจะไม่ เปลี่ยนแปลง นอก เหนือ

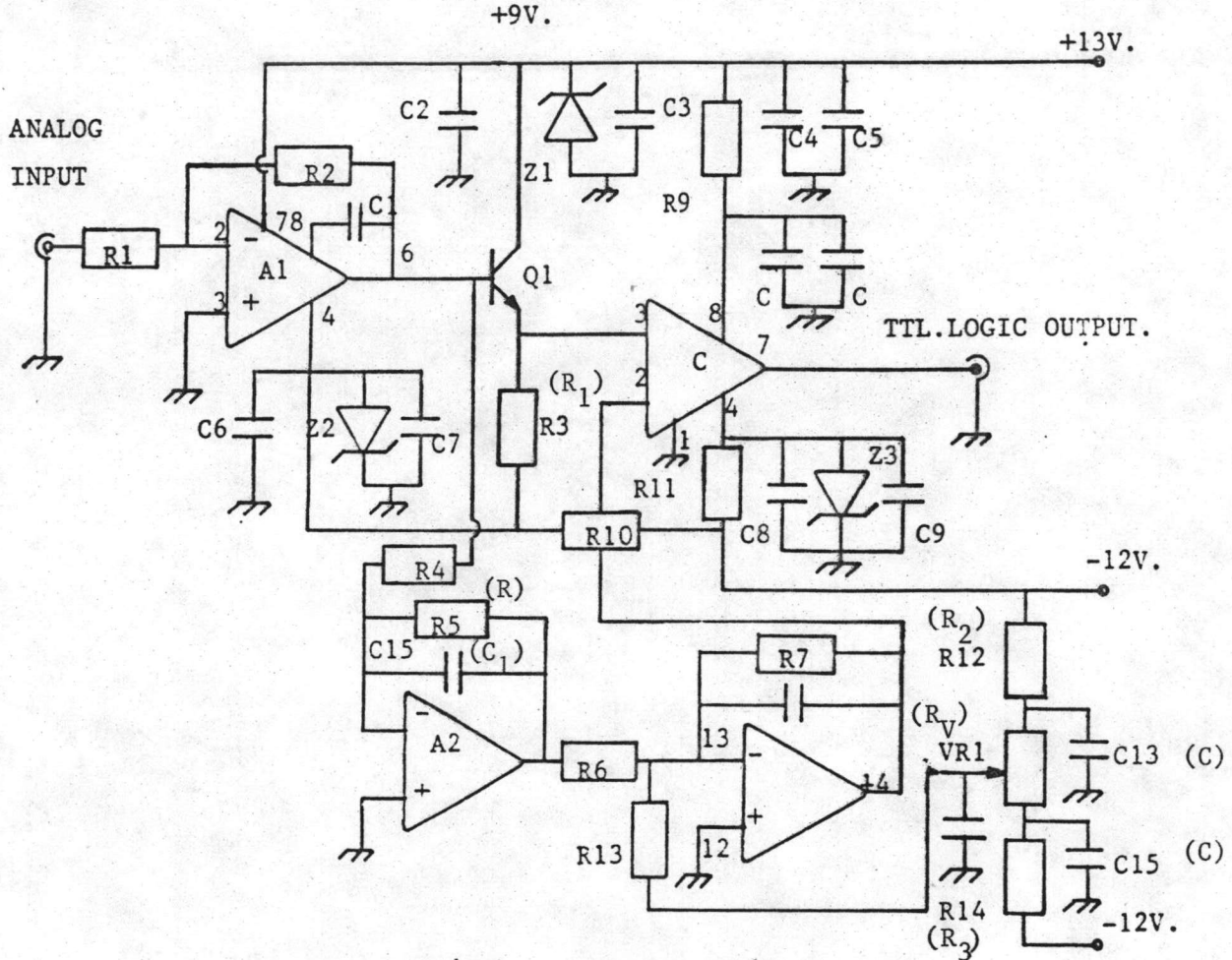
จากนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณของแอกตีฟยังเร็วกว่าวงจรประเภทพาสสีฟ การกำหนดอัตราการขยาย A_1 และ A_2 จะมีอัตราการขยายประมาณ -1 การที่เพิ่มเติมอุปกรณ์การปรับระดับแรงดันที่ขาทางเข้าของ A_2 ก็เพื่อทำให้จุดเปรียบเทียบไม่ได้เกิดขึ้นที่ V_{DC} แต่จะเปลี่ยนไปอยู่ที่ระดับ $\pm$ dV ซึ่งเป็นค่าที่สามารถกำหนดและป้อนเข้าทางขาอินพุทของ A_2 การที่เพิ่มค่าแรงดันค่านี้ก็เพื่อทำให้วงจรเกิดค่า Hysteresis ทำให้ระดับการตัดสินใจเปลี่ยนมาอยู่ที่ $V_{DC} \pm$ dV เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดมากับสัญญาณที่รับได้ บัฟเฟอร์ (Buffer) ทำหน้าที่เพียงแต่ตัวเชื่อมวงจรเปรียบ-เทียบกับภาคขยายสัญญาณอะนาลอก เพราะต้องการให้วงจรภาคอะนาลอกเห็นวงจรเปรียบเทียบมีความต้านทานขาเข้าสูง สัญญาณจะได้ไม่ผิดเพี้ยนและขนาดจะได้ไม่เปลี่ยนแปลง การออกแบบเป็นการใช้วงจรทรานซิสเตอร์ต่อแบบอิมิตเตอร์ ฟอลโลเวอร์ (Emitter Follower)

- วงจรเปรียบเทียบ (Comparator) ทำหน้าที่เปรียบเทียบระดับสัญญาณ $V_{DC} + V_S$ กับสัญญาณระดับอ้างอิง $V_{DC} \pm$ dV ทำให้เกิดเอาท์พุทเป็นสัญญาณทีทีแอลโดยตรง



รูปที่ 3.16 หลักการทำงานของวงจรภาคดีเทคเตอร์

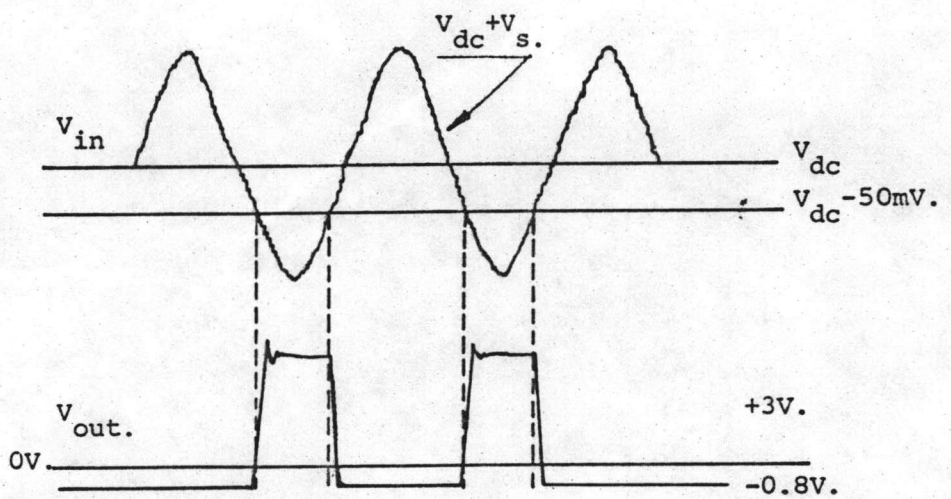
จากรูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบจะกระทำกันที่ค่า V_{DC} - dV เมื่อ $V_{DC} + V_S < V_{DC}$ - dV จะเกิดเอาท์พุทเป็นลอจิก "1" และเมื่อ $V_{DC} + V_S > V_{DC}$ - dV เอาท์พุทจะเปลี่ยนเป็นลอจิก "0" จะเห็นได้ว่าแม้ V_{DC} จะเปลี่ยนแปลงการเปรียบเทียบก็ยังเกิดด้วยเงื่อนไขเดิมทุกประการ



รูปที่ 3.17 วงจรดีเทคเตอร์

จากรูปที่ 3.17 ภาคดีเทคเตอร์ประกอบด้วยวงจรกรองผ่านต่ำแบบแอกตีฟ 2 ชุด ซึ่งเป็นการต่อแบบให้อัตราการขยายเท่ากับหนึ่ง โดยการใช้ค่าความต้านทาน R และใช้ค่า ค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant) ของการกรองเท่ากับ $1/RC_1$ และใช้ออปแอมป์เบอร์ LM 324 สาเหตุที่เลือกใช้ IC เบอร์นี้เพราะใน IC 1 ตัวประกอบไปด้วยออปแอมป์ 4 ตัว สำหรับวงจร A_2 ก็เช่นกัน แต่เพิ่มเติมส่วนปรับระดับแรงดันโดยใช้วงจร R_2, R_V, R_3, C โดยที่ R_2C และR_3C เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำและทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งระดับแรงดันให้มีค่าบน R_V ไม่สูงนัก การปรับระดับ dV จะทำโดยการปรับค่า R_V จะได้ค่า dV ซึ่งอาจจะเป็น -dV หรือ +dV ก็ได้ Q_1 จะออกแบบเป็นวงจรอิมิตเตอร์ ฟอลโลเวอร์โดยมีการไบแอสไว้ที่เบสเท่ากับศูนย์โวลต์ และ R_1จะ

เป็นภาระทางไฟฟ้าให้กับวงจรโดยต่อมาจาก -12V ตัวเปรียบเทียบจะใช้ไอซีเบอร์ μA 710 ซึ่งมีอัตราการขยายทางด้านแรงดันสูงอยู่ในช่วง 1500 เท่า และเป็นไอซีที่ให้เอาท์พุทของการเปรียบเทียบเป็นสัญญาณแบบทีทีแอลโดยตรง ทางด้านอินพุทของตัวเปรียบเทียบจะรับมาจากขาอิมิตเตอร์ของ Q_1 และสัญญาณอ้างอิงมาจากเอาท์พุทของ A_2 ผลการทำงานของวงจรแสดงไว้ในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ผลการทำงานของวงจรดีเทคเตอร์

สำหรับวงจรดีเทคเตอร์นี้ได้ปรับให้ dV มีค่า -50 mV ทำให้สามารถเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้มีขนาดไม่ต่ำกว่า 100 mV_{p-p} และสามารถเปรียบเทียบสัญญาณได้ถึงสัญญาณที่ความถี่ 2 MHz โดยมีช่วงกว้างของพัลซ์เปลี่ยนบ้างเล็กน้อย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 บทสรุป

จากการทดลองในบทนี้พอสรุปได้ว่า

1. การออกแบบวงจรภาคส่งที่ใช้ส่งข้อมูลเชิงเลขนั้น สามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้อุปกรณ์ IC แบบทีทีแอลโดยทั่ว ๆ ไป สามารถทำการตอบสนองต่อความถี่ได้สูงตามความต้องการคือถึง 2 MHz และพบว่าความสามารถของวงจรภาคส่งจะถูกจำกัดอยู่ที่ตัว LED เอง เพราะ LED จะไม่สามารถตอบสนองต่อความถี่ได้สูงพอ แต่อย่างไรก็ดีถ้าสามารถเลือกใช้ LED ที่มีคุณสมบัติที่ดี เช่น เบอร์ OC-1 ก็สามารถทำงานได้ดีเช่นกัน

2. ทางด้านวงจรภาครับ เนื่องจากมีความต้องการทั้งอัตราการขยายที่สูง และมีแบนด์วิดท์กว้าง ขณะเดียวกันต้องควบคุมสัญญาณรบกวนให้มีขนาดต่ำ การออกแบบจึงค่อนข้างละเอียดอ่อน และประจวบกับข้อจำกัดของ PIN PD ที่มีอยู่ การทดลองจึงได้เริ่มต้นที่การศึกษาคุณสมบัติของ PIN PD ก่อน และพบว่าสามารถนำ PIN PD เบอร์ TIL 100 มาใช้งานในย่านความถี่ช่วง 2 MHz นี้ สำหรับ TIL 100 นี้เป็น PIN PD ที่มีขายในท้องตลาดราคาไม่แพงนัก หลังจากที่คัดเลือก PIN PD ก็ได้ทำการทดลองวงจรที่จะใช้งาน โดยการเปรียบเทียบตั้งแต่การขยายด้วยทรานซิสเตอร์ธรรมดาจนถึงออปแอมป์ พอสรุปได้ว่า สามารถนำมาใช้งานได้ เช่น วงจรที่ใช้ออปแอมป์ แต่อย่างไรก็ดีวงจรที่ได้รับการพัฒนานำมาใช้งานจริง ๆ ได้นำความคิด และข้อสรุปจากบทนี้ไปใช้และได้ทำการออกแบบแก้ไขข้อบกพร่อง ซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

3. วงจรดีเทคเตอร์ นับว่าเป็นส่วนสำคัญสำหรับการทำงานรับ - ส่งข้อมูลเชิงเลข เพราะจะต้องทำการเปลี่ยนสัญญาณกลับไปเป็นสัญญาณเชิงเลขแบบทีทีแอลให้ได้ไม่ว่าสัญญาณที่รับได้จะมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป ในบทนี้ได้ทดลองทำการออกแบบในรูปของวงจรที่ทำการปรับสภาวะตัวเอง และพบว่าถ้าหากทำงานในเงื่อนไขที่มีแสงรบกวนมากวงจรอาจจะถึงจุดอิ่มตัวและทำให้การทำงานผิดพลาดได้ ดังนั้น วงจรที่ใช้งานจึงได้ปรับปรุงซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 4

จากการทดลองและทำการสร้างชุดทดลองขึ้นมา สามารถสรุปปัญหาและเป็นแนวทางในการออกแบบชุดรับ - ส่งข้อมูลเชิงเลขในบทต่อไปให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอีกด้วย