

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสื่อสารทางเดียวสำหรับภาพและเสียงผ่านเส้นใยนำแสง



รพ. นางสาวปราณี ปฐวีศรีสุธา
ป 145ก นางสาวทิวรัตน์ บุญเรือง
2538

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วันเดือนปี.....

.b12549939

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**One Way Communication of Voice and Image
Via Optical Fibers**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang
1995**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสื่อสารทางเคียวสำหรับภาพและเสียงผ่านเส้นใยนำแสง
นักศึกษา	นางสาวปราณี ปฐวีศรีสุธา นางสาวทิวรัตน์ บุญเรือง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน ดร. รัชภักย์ จิตต์อารี อ. ชีรวัดน์ ประกอบผล
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2538

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและออกแบบระบบการสื่อสารแบบซิมเพล็กซ์ (Simplex) เพื่อส่งผ่านสัญญาณข้อมูลภาพและเสียงโดยใช้เส้นใยนำแสงเป็นช่องทางสื่อสาร วงจรแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ วงจรของภาพและวงจรของเสียง ซึ่งทั้ง 2 วงจรประกอบด้วย ภาควงจรส่งและภาควงจรรับ โดยภาควงจรส่งมีหน้าที่รับสัญญาณข้อมูลมาทำการขยายสัญญาณให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อทำการมอดูเลชันให้สัญญาณสามารถขับ LED ให้เปล่งแสงป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสง ส่วนวงจรวงจรรับมีหน้าที่รับสัญญาณแสงจากเส้นใยนำแสง มาทำการแปลงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อทำการขยายสัญญาณให้เหมาะสมกับการดีมอดูเลชัน สัญญาณที่ผ่านการดีมอดูเลชันแล้ว จะเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่มีลักษณะเหมือนกันกับ สัญญาณข้อมูลอินพุตที่ป้อนเข้ามาที่ภาควงจรส่ง ผลที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าอัตราส่วนสูงสุดของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่า 23.098 dB

Special Project Title One Way Communication of Voice and Image Via
Optical Fibers

Name Ms. Pranee Pataweesrisutha
 Ms. Tiwarat Boonroeng

Special Project Adviser Asst.Prof.Dr. Preecha Yupapin
 Dr. Ratchapak Chitaree
 Mr. Teerawat Prakobphon

Department Applied Physics

Academic Year 1995

Abstract

This special project is the description of the design and construction of the transmission of Voice and Video signals using a simplex fiber optic system. It consists of 2 parts, ie. Voice and Video systems, each of them has the same mainly, transmitter and receiver circuits. The input signal is amplified by modulation process after that a modulated signal is sent to drive an LED to provide the optical output signal. The optical signal is converted to be the electrical signal by a photodiode. Results have shown that the optimum s/n ratio of 23.098 dB is obtained.

กิติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการพิเศษ เรื่องการสื่อสารทางเดียวสำหรับภาพและเสียงผ่านเส้นใยนำแสง ถ้าจะเป็นประโยชน์แก่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแล้ว ผู้จัดทำโครงการพิเศษ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณอาจารย์ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษา เพื่อให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดังมีรายนามต่อไปนี้

ผศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ

ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษและ
สนับสนุนเครื่องมือ

อ.ธีรวัฒน์ ประกอบผล

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษและ
ให้คำปรึกษาด้านวงจรต่าง ๆ

อ.วิจิต ศรีโชติ

กรุณาให้คำปรึกษา

นายปรเมษฐ์ จันทร์เพ็ง

ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางแก้ไขปัญหา

คุณเพลินพิศ ชาตาคี

เอื้อเพื่อเครื่องคอมพิวเตอร์

ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อพิเศษภาษาไทย

บทคัดย่อพิเศษภาษาอังกฤษ

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญตาราง

สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	2
1.2 ขอบเขตการทำงาน	2
1.3 ขั้นตอนในการปฏิบัติงาน	2
1.4 สรุป	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ระบบการสื่อสารโดยย่อ	4
2.1.1 อุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต	4
2.1.2 เครื่องส่ง	5
2.1.3 ช่องทางสื่อสาร	5
2.1.4 เครื่องรับ	5
2.1.5 สัญญาณรบกวน	6
2.2 รูปแบบของการสื่อสาร	6
2.2.1 ระบบซิมเพล็กซ์	6
2.2.2 ระบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์	6
2.2.3 ระบบฟูลดูเพล็กซ์	6
2.3 สัญญาณข้อมูล	7
2.3.1 สัญญาณเสียง	7
2.3.2 สัญญาณภาพ	13
2.4 ทฤษฎีและหลักการทางแสงและเส้นใยนำแสง	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2	เส้นใยนำแสง	21
2.4.3	ลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงภายในเส้นใยนำแสง	22
2.4.4	ชนิดของเส้นใยนำแสง	28
2.4.5	โครงสร้างของเส้นใยนำแสง	32
2.4.6	คุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยนำแสง	34
2.4.7	ออปโตอิเล็กทรอนิกส์	38
2.5	การมอดคูเลชัน	48
2.5.1	การมอดคูเลชันทางอนาล็อก	49
2.5.2	การมอดคูเลชันทางดิจิทัล	57
2.6	การมัลติเพล็กซ์	60
2.6.1	การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่	60
2.6.2	การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา	63
2.6.3	การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	63
บทที่ 3	การออกแบบวงจรที่ใช้ในโรงงาน	65
3.1	วงจรเสียง	65
3.1.1	วงจรส่งเสียง	65
3.1.2	วงจรรับเสียง	69
3.2	วงจรภาพ	74
3.2.1	วงจรส่งภาพ	74
3.2.2	วงจรรับภาพ	75
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	79
4.1	ผลการทดลอง	79
4.1.1	วงจรทางเสียง	79
4.1.2	วงจรทางภาพ	83
4.2	วิจารณ์ผลการทดลอง	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	88
5.1 สรุป	88
5.1.1 วงจรเสียง	88
5.1.2 วงจรภาพ	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก Datasheet	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่าง ๆ	18
ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง	22
ตารางที่ 2.3 แสดงการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง	29
ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสีย ของตัวตรวจจับแสงแบบต่าง ๆ	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงระบบสื่อสารพื้นฐาน	4
รูปที่ 2.2 แสดงย่านความถี่ต่าง ๆ ที่ใช้กับสัญญาณเสียง	7
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่	8
รูปที่ 2.4 a) แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของไมโครโฟน	9
b) แสดงคุณสมบัติของไมโครโฟนจำกัดทิศทาง	9
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของไมโครโฟนแบบขดลวดเคลื่อนที่	10
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์	11
รูปที่ 2.7 a) แสดงรูปหน้าตัดของคาร์บอนแบบขดลวดเคลื่อนที่	12
b) แสดงวงจรสมมูลย์ของคาร์บอนไมโครโฟน	12
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของลำโพงแบบขดลวดเคลื่อนที่	12
รูปที่ 2.9 แสดงการกวาดแบบสลับเส้น (Interface Scanning)	14
รูปที่ 2.10 แสดงรายละเอียด สัญญาณภาพมาตรฐาน PAL	16
รูปที่ 2.11 แสดงรายละเอียดใน 1 เส้นกวาดแนวนอน ซึ่งประกอบด้วย สัญญาณซิงค์แบลงกิ้งและลูมินันซ์	16
รูปที่ 2.12 แสดงช่วงและชนิดของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	17
รูปที่ 2.13 แสดงการเดินทางของแสงผ่านตัวกลาง (n_1) ไปตัวกลาง (n_2) ; $n_1 > n_2$	19
รูปที่ 2.14 แสดงทางเดินของแสง ที่มุมวิกฤต	20
รูปที่ 2.15 แสดงทางเดินของแสง ที่เดินทางผ่านตัวกลาง (n_1) ไปตัวกลาง (n_2) ; $n_1 < n_2$	20
รูปที่ 2.16 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง	23
รูปที่ 2.17 แสดงผลของ NA และขนาดของ Core ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ การเชื่อมต่อแสงระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสง	24
รูปที่ 2.18 แสดงแสงเส้นใยนำแสงแบบกลมและแบบระนาบแบน	25
รูปที่ 2.19 แสดงการสะท้อนกลับของแสง ที่รอยต่อของตัวกลาง	26
รูปที่ 2.20 แสดง Propagation Mode ภายในเส้นใยนำแสง	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21	แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน Core ของเส้นใยนำแสง แต่ละชนิด	30
รูปที่ 2.22	แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน GI Fiber	31
รูปที่ 2.23	แสดง Parameter ทางโครงสร้างของ Multi Mode Optic Fiber	32
รูปที่ 2.24	แสดงแผนผังคุณสมบัติต่าง ๆ ของ Parameter ทางโครงสร้างของ เส้นใยนำแสง	33
รูปที่ 2.25	แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Mode Field	34
รูปที่ 2.26	แสดงสาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง	34
รูปที่ 2.27	แสดงคุณสมบัติการสูญเสียแสง จากการดูดแสงของเส้นใยนำแสง ที่ทำด้วยแก้ว	36
รูปที่ 2.28	แสดง Scattering ของแสงในบรรยากาศ	36
รูปที่ 2.29	แสดงสาเหตุของการสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง	38
รูปที่ 2.30	แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็ก และแสดงย่านการใช้งานของ อปโตอิเล็กทรอนิกส์	39
รูปที่ 2.31	แสดงรูปร่างและสัญลักษณ์ของ LDR	39
รูปที่ 2.32	แสดงสัญลักษณ์ของโฟโตไดโอด	40
รูปที่ 2.33	แสดงวงจรพื้นฐานของโฟโตทรานซิสเตอร์	41
รูปที่ 2.34	แสดงสัญลักษณ์ของ LED	43
รูปที่ 2.35	แสดงวงจรใช้งาน LED	43
รูปที่ 2.36	เมื่อใช้ LED กับแรงดันไฟสลับ	43
รูปที่ 2.37	แสดงวงจรควบคุมหลอดไฟไฟโดยใช้ทรานซิสเตอร์	44
รูปที่ 2.38	แสดงโครงสร้างของ LCD	45
รูปที่ 2.39	การแสดงผลของ LCD	45
รูปที่ 2.40	แสดงการเกิดของแสงเลเซอร์	46
รูปที่ 2.41	เลเซอร์ตัวแรกใช้แท็บทิม	47
รูปที่ 2.42	แสดงการเกิดเลเซอร์แบบ 4 ชั้นพลังงาน	47
รูปที่ 2.43	การมอดคูเลตทางแอมพลิจูดโดยใช้อุปกรณ์อนลิเนียร์	51
รูปที่ 2.44	การใช้สัญญาณเสียงที่มีขนาดมากและน้อยเพื่อมอดคูเลชัน	51
รูปที่ 2.45	การวัดเปอร์เซ็นต์การมอดคูเลชัน	52

รูปที่ 2.46	แอมพลิจูดของสัญญาณเสียงที่ดี มอดคูเลชันคืนมาได้ที่เครื่องรับ จะมีความแรงมากขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของการมอดคูเลชัน	53
รูปที่ 2.47	การโอเวอร์มอดคูเลชันจะทำให้สัญญาณที่ได้จากการคิมอดคูเลชันที่เครื่องรับมีความเพี้ยน	53
รูปที่ 2.48	แสดงการมอดคูเลชันทางความถี่	54
รูปที่ 2.49	แสดงความแตกต่างระหว่างคลื่น PM และ FM	56
รูปที่ 2.50	a) แสดงแอมพลิตูด $P(t)$ b) แสดงคลื่นมอดคูเลต $m(t)$ c) แสดงรูปคลื่น PAM	58
รูปที่ 2.51	แสดงเทคนิคของ PPM และ PWM	59
รูปที่ 2.52	แสดงรูปคลื่นของสัญญาณของการมอดคูเลชัน แบบ PCM	60
รูปที่ 2.53	แสดงการแบ่งกลุ่ม	60
รูปที่ 2.54	แสดงการรวมช่องสัญญาณตั้งแต่ ช่อง 1 ถึงช่อง 2	62
รูปที่ 2.55	แสดงการแบ่งช่องและกลุ่มของกลุ่มซูปเปอร์	62
รูปที่ 2.56	แสดงการทำงานของระบบ WDM	64
รูปที่ 3.1	แสดงวงจรปริแอมพลิไฟร์	66
รูปที่ 3.2	แสดงวงจร Pulse Frequency Modulation (PFM)	67
รูปที่ 3.3	แสดงวงจร Driver	68
รูปที่ 3.4	แสดงวงจรการทำงานของออปโตแอมป์ แบบ Current-to-Voltage	70
รูปที่ 3.5	แสดงวงจรขยายสัญญาณ	70
รูปที่ 3.6	แสดงลักษณะการทำงานแบบเฟสล็อกคูลูป	72
รูปที่ 3.7	แสดงวงจรคิมอดคูเลต	73
รูปที่ 3.8	แสดงวงจรขับลำโพง	73
รูปที่ 3.9	แสดงวงจรส่งภาพ	75
รูปที่ 3.10	แสดงวงจรรับภาพ	76
รูปที่ 3.11	แสดงวงจรทางภาคส่งเสียงที่ใช้ในงาน ใน โครงการงาน	77
รูปที่ 3.12	แสดงวงจรทางภาครับเสียงที่ใช้ในงาน ใน โครงการงาน	78
รูปที่ 4.1	รูปแสดงชุดทดลองรับส่งสัญญาณเสียง	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2	รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ที่ได้จากการป้อน สัญญาณอินพุตรูปไซน์ ความถี่ 250 Hz แอมพลิจูด 50 mV แก่ชุดทดลองรับส่งสัญญาณเสียง	80
รูปที่ 4.3	รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ที่ได้จากการป้อน สัญญาณอินพุตรูปไซน์ ความถี่ 10 kHz แอมพลิจูด 50 mV แก่ชุดทดลองรับส่งสัญญาณเสียง	81
รูปที่ 4.4	รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ที่ได้จากการป้อน สัญญาณอินพุตรูปไซน์ ความถี่ 19 kHz แอมพลิจูด 50 mV แก่ชุดทดลองรับส่งสัญญาณเสียง	81
รูปที่ 4.5	รูปแสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณข้อมูลที่รับ ได้หลังจาก ทำการเปิดเครื่องส่ง	82
รูปที่ 4.6	รูปแสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณรบกวนที่รับ ได้หลังจาก ทำการปิดเครื่องส่ง	83
รูปที่ 4.7	รูปแสดงชุดทดลองรับส่งสัญญาณภาพ	84
รูปที่ 4.8	รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดทดลองรับส่ง สัญญาณภาพ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตรูปไซน์ ความถี่ 2 MHz	84
รูปที่ 4.9	รูปแสดงภาพตัวอย่างบนจอมอนิเตอร์ ที่ได้จากกล้องวิดีโอโดยตรง	85
รูปที่ 4.10	รูปแสดงภาพตัวอย่างบนจอมอนิเตอร์ ที่ได้จากการส่ง สัญญาณวิดีโอผ่านชุดทดลองรับส่งสัญญาณภาพ	85
รูปที่ 4.11	รูปแสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณภาพที่รับ ได้ หลังจาก ทำการเปิดเครื่องส่ง	85
รูปที่ 4.12	รูปแสดงสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณรบกวนที่รับ ได้ หลังจาก ทำการปิดเครื่องส่ง	87

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลสัญญาณภาพและเสียงได้มีการนำเส้นใยนำแสงมาใช้งานแทนสายโทรศัพท์ เนื่องจากว่าเส้นใยนำแสงมีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการส่งสัญญาณโดยอาศัยคลื่นพาหะที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าธรรมดาอยู่หลายประการ ดังนี้คือ

- มีช่วงแบนด์วิธที่กว้างมาก
- เส้นใยนำแสงมีขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา
- ในระบบแสงนั้นไม่มีการรบกวน จากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และไม่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าไปรบกวนระบบข้างเคียง

- สามารถส่งผ่านสัญญาณที่มีความต่อเนื่อง เช่น สัญญาณภาพได้ดี
- เส้นใยนำแสงไม่เกิดการสุกกร่อน ซึ่งต่างจากสายส่งสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นโลหะ
- สามารถผลิตได้ในราคาที่ถูกลง เพราะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือ สารจำพวก SiO_2 ที่มีอยู่มากในธรรมชาติเพราะเป็นสารที่มีอยู่ในทราย

แต่อย่างไรก็ดีเส้นใยนำแสงก็มีข้อเสียบ้างดังนี้

- แดกหักง่าย
- การเชื่อมต่อทำได้ยากและต้องการความแม่นยำสูงมาก
- ใช้ส่งกำลังงานไฟฟ้าสำหรับเลี้ยงระบบต่าง ๆ ไม่ได้

แต่ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ไม่เป็นเรื่องสำคัญนักเมื่อเปรียบเทียบกับข้อดีของการสื่อสารด้วยระบบนี้โครงการนี้จึงได้นำเส้นใยนำแสงมาใช้ส่งผ่านสัญญาณข้อมูลภาพและเสียง

วิธีการส่งผ่านสัญญาณซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้ 2 ชนิดคือ การสื่อสารด้วยสัญญาณทางดิจิทัลและทางอนาล็อกโดยสัญญาณทางดิจิทัลเป็นสัญญาณที่ค่าของสัญญาณนั้นเกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่องกันตลอดเวลา เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นระยะ ๆ แล้วหายกลายเป็นศูนย์ไปอย่างทันทีทันใดชั่วขณะ ชั่วระยะเวลาหนึ่งก็กลับมีค่าขึ้นอีก เป็นระยะ ๆ และเป็นช่วง ๆ เช่นนี้เรียกไปตลอดเวลา ส่วนสัญญาณทางอนาล็อกเป็นสัญญาณที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างต่อเนื่องโดยทั่วไปสัญญาณที่เกิดตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณอนาล็อกเกือบทั้งสิ้น ซึ่งการสื่อสารด้วยระบบดิจิทัลจะมีข้อดีมากกว่าทางอนาล็อกทั้งใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่องระยะทางที่ไกลกว่าและสัญญาณรบกวนที่น้อยกว่า แต่ข้อเสียก็คือมีวงจรที่มีการทำงานที่ยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าทางอนาล็อก

1.1 วัตถุประสงค์

- 1.) เพื่อทำการศึกษาหลักการ ทฤษฎี และวิธีการส่งผ่านสัญญาณข้อมูลภาพและเสียงผ่านเส้นใยนำแสง
- 2.) เพื่อทำการศึกษาวงจรที่จะนำมาใช้งานและการทำงานของวงจรอย่างละเอียด
- 3.) ทดลองสร้างระบบรับและระบบส่งข้อมูล เป็นชุดทดลองส่งสัญญาณภาพและสัญญาณเสียง
- 4.) ทดสอบคุณภาพของระบบสื่อสารที่สร้างขึ้น แก้ไขให้มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุดและพยายามเพิ่มระยะทางการสื่อสารให้มากขึ้นเท่าที่ทำได้

1.2 ขอบเขตการทำงาน

- 1.) สร้างระบบการสื่อสารทางเดียวเพื่อส่งผ่านข้อมูลที่เป็นสัญญาณภาพและเสียงผ่านเส้นใยนำแสงในระยะใกล้ ๆ
- 2.) ทดสอบคุณภาพของสัญญาณภาพและเสียงที่ส่งผ่านระบบที่สร้างขึ้นโดยตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต
- 3.) เพิ่มระยะทางการรับส่งข้อมูลให้ไกลที่สุดเท่าที่ทำได้

1.3 ขั้นตอนในการปฏิบัติงาน

- 1.) ทำการศึกษาหลักการ ทฤษฎีและวิธีการส่งผ่านสัญญาณข้อมูลแบบต่าง ๆ และข้อดีข้อเสียของวิธีการส่งแต่ละแบบเพื่อเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมที่สุดในการทำโครงการ
- 2.) ทำการศึกษาวงจรที่จะนำมาใช้งาน โดยพิจารณาถึงอุปกรณ์ที่จะใช้ การทำงานของแต่ละอุปกรณ์ การทำงานของทั้งระบบวงจร ผลที่คาดว่าจะได้รับ และสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ สถานที่ ที่เป็นแหล่งจำหน่ายหรือสถานที่ที่สามารถจัดหาอุปกรณ์ได้ เพื่อป้องกันปัญหาเรื่องการขาดอุปกรณ์
- 3.) ทำการทดลองสร้างระบบรับและระบบส่งสัญญาณข้อมูล ด้วยวงจรจำลองแบบชั่วคราวบนแผ่นโปรโตบอร์ด เพื่อทดสอบการทำงานที่แท้จริงของระบบวงจรว่าเป็นจริงตามทฤษฎีหรือไม่ และแก้ไขจุดบกพร่องในการทำงานของวงจรมันให้ได้ผลการทดลองตามต้องการหรือได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) สร้างระบบรับและระบบส่งสัญญาณข้อมูลแบบถาวร บนแผ่น PCB (Print Circuit Board) แล้วทำการทดสอบระบบรวม อีกครั้งให้ได้ผลการทดลองตามที่ได้ทดสอบบนวงจรจำลอง ซึ่งจะต้องได้ผลที่เหมือนเดิมหรืออาจได้ผลที่ดีขึ้น เนื่องมาจากสัญญาณรบกวนมีน้อยกว่า

5.) จัดทำระบบวงจรทั้งหมดให้เรียบร้อย โดยเชื่อมต่อวงจรย่อยแต่ละวงจรและจัดลงกล่องเพื่อสะดวกแก่การใช้งาน เคลื่อนย้าย และความเรียบร้อย

6.) ทดสอบการทำงานของทั้งระบบอีกครั้ง และทดสอบหาระยะการส่งสัญญาณข้อมูลที่ไกลที่สุด

1.4 สรุป

ในช่วงแรกได้เลือกศึกษาระบบการสื่อสารแบบดิจิทัล แต่เนื่องจากระบบนี้มีความยุ่งยากมากเกินไปจึงเปลี่ยนแนวทางไปศึกษาทางระบบอนาล็อกแทน ซึ่งก็พบว่าสามารถทำงานได้ดีในระดับหนึ่ง และไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก ในที่สุดจึงตัดสินใจเลือกระบบทางอนาล็อกส่งสัญญาณภาพและเสียง โดยแยกการทำงานของวงจรเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- วงจรของสัญญาณภาพ แบ่งออกได้อีก 2 ส่วนคือระบบส่ง ช่องทางสื่อสาร และระบบรับ

- วงจรของสัญญาณเสียงแบ่งออกได้อีก 2 ส่วนคือระบบส่ง ช่องทางสื่อสาร และระบบรับ

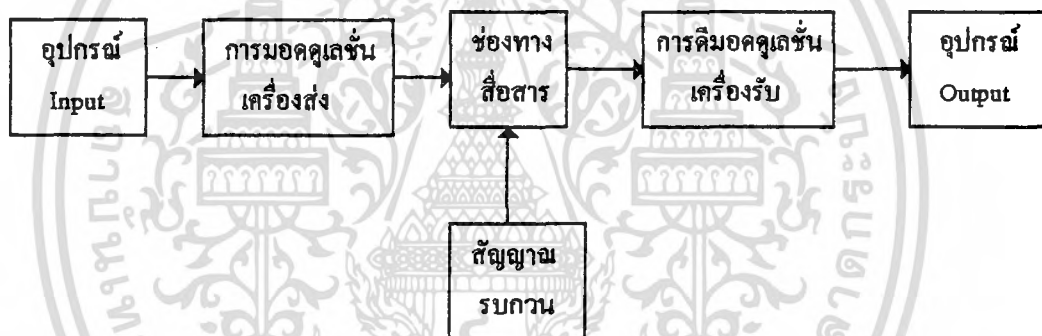
จากที่กล่าวมาจะต้องใช้สายส่งสัญญาณถึง 2 เส้น ดังนั้นการปรับปรุงระบบจึงอาจกระทำได้ เพื่อการลดปริมาณสายส่งสัญญาณ โดยอาจทำการมัลติเพล็กซ์ โดยเลือกทำการมัลติเพล็กซ์ทางแสง (การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น) ที่ระบบส่งแล้วดีมัลติเพล็กซ์ที่ระบบรับเพื่อแยกสัญญาณให้เป็นดังสัญญาณเดิม เมื่อระบบรวมสามารถทำงานได้ตามต้องการแล้วจึงทำการทดสอบเรื่องระยะทางเพื่อเพิ่มระยะทางการทำงานที่ไกลที่สุดเท่าที่ทำได้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ระบบการสื่อสารโดยย่อ

ในระบบสื่อสารไม่ว่าจะเป็นระบบใดก็ตาม แผนผังพื้นฐานมักเหมือนกับรูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารโดยพื้นฐานประกอบด้วย อุปกรณ์อินพุต (Input Device) เครื่องส่ง ช่องทางสื่อสาร (Communication Channel) หรือแชนแนล ซึ่งมักจะมีสัญญาณรบกวนมารบกวน เครื่องรับและอุปกรณ์เอาพุต (Output Device)



รูปที่ 2.1 แสดงระบบสื่อสารพื้นฐาน

2.1.1 อุปกรณ์อินพุตและเอาท์พุต ความจริงอุปกรณ์อินพุต คือ อุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณข้อมูลเป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่วนอุปกรณ์เอาท์พุต คือ อุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากลับมาเป็นสัญญาณข้อมูล นั่นเอง มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปแล้วแต่การใช้งาน เช่น ในระบบวิทยุกระจายเสียง อุปกรณ์อินพุตอาจเป็นไมโครโฟน และอุปกรณ์เอาท์พุตจะเป็นลำโพง สำหรับไมโครโฟนทำหน้าที่แปลงคลื่นเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่วนลำโพงทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากลับเป็นคลื่นเสียง

ในทำนองเดียวกัน ในระบบแพร่ภาพทางโทรทัศน์อุปกรณ์อินพุต คือ กล้องถ่ายโทรทัศน์ ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสง (จากภาพ) ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า และอุปกรณ์เอาท์พุต คือ หลอดภาพโทรทัศน์ ซึ่งเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากลับคืนเป็นพลังงานแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตของระบบสื่อสารยังมีอีกมากมาย เช่น คันเคาะโทรเลข เครื่องโทรพิมพ์ เครื่องโทรสาร เครื่องโทรมาตร(Telemetry) ฯลฯ อุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตจะต่อเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับเสมอ

ข่าวสารที่รับหรือส่งระหว่างกัน แบ่งออกไปเป็น 3 พวกใหญ่ ๆ คือ

1.) เสียงหรือออดิโอ (Audio) ได้แก่ เสียงพูดในระบบโทรศัพท์ เสียงพูด เสียงเพลง หรือเสียงดนตรี ซึ่งต้องการคุณภาพเสียงดีในระบบวิทยุกระจายเสียง

2.) ภาพ (Picture) ได้แก่ ภาพนิ่งในระบบโทรสารและระบบส่งภาพระยะไกล (telephoto) ภาพยนตร์ในระบบโทรทัศน์

3.) ข้อมูล (Data) ส่วนใหญ่ส่งเป็นรหัสให้แก่ เครื่องยนต์ เครื่องจักร เครื่องคอมพิวเตอร์ ฯลฯ ได้แก่ ข้อมูลและคำสั่งในระบบโทรมาตร ตัวอักษรในระบบโทรพิมพ์หรือโทรเลข ข้อมูลคอมพิวเตอร์ในระบบสื่อสารคอมพิวเตอร์

2.1.2 เครื่องส่ง เครื่องส่ง ทำหน้าที่รับสัญญาณ ไฟฟ้าจากอุปกรณ์อินพุตและทำการมอดูเลชันลงบนคลื่นพาหะความถี่สูง เครื่องส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง(เรียกว่า ออสซิลเลเตอร์) กับ มอดูเลชัน เครื่องส่งส่วนใหญ่มักมีภาคขยายอีกเพื่อให้สัญญาณที่ส่งออกอากาศมีกำลังแรงทำให้สื่อสารกันได้ไกลขึ้น

2.1.3 ช่องทางสื่อสาร ช่องทางสื่อสารในที่นี้ ได้แก่ บรรยากาศ (Free Space) สายโทรศัพท์ ฯลฯ แต่ในที่นี้เราจะกล่าวถึงเฉพาะระบบวิทยุเท่านั้น ช่องทางสื่อสารของระบบวิทยุอาศัยการแผ่คลื่นวิทยุออกไป โดยผ่านบรรยากาศซึ่งเป็นตัวกลาง (Medium) ซึ่งคลื่นเดินทางจากเครื่องส่งผ่านไปยังเครื่องรับ

2.1.4 เครื่องรับ เมื่อรับสัญญาณจากเครื่องส่งมาถึงเครื่องรับ สัญญาณจะมีกำลังอ่อนลงและยังมีสัญญาณรบกวนเข้ามาแทรกแซงสัญญาณที่ต้องการจะรับอีกด้วย ดังนั้นการรับสัญญาณอ่อน ๆ เช่นนี้ เครื่องรับจึงต้องมีความสามารถพิเศษในการเลือกรับและขยายเอาเฉพาะสัญญาณความถี่ที่ต้องการ พร้อมทั้งต้องมีกรรมวิธีในการกำจัดสัญญาณรบกวน สัญญาณที่รับได้ จะผ่านการคิมอดูเลชันเพื่อแปลงสัญญาณข่าวสารกลับมา กรรมวิธีนี้ค่อนข้างสลับซับซ้อนพอสมควร

2.1.5 สัญญาณรบกวน เป็นสัญญาณที่เข้ามาแทรกแซงหรือรบกวน สัญญาณรบกวนที่รับเข้ามา แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1.) สัญญาณรบกวนบรรยากาศ (Atmospheric Noise) เกิดขึ้นจากความแปรปรวนของบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก เช่น ฟ้าแลบ ฟ้าผ่า ก่อให้เกิดคลื่นวิทยุแผ่กระจายออกไปรอบโลก สัญญาณรบกวนประเภทนี้เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา แม้จะไม่มีพายุฝนฟ้าคะนองก็ตาม

2.) สัญญาณรบกวนจากอวกาศ (Space Noise) เกิดจากดวงอาทิตย์และดวงดาวในจักรวาล เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นวัตถุที่มีขนาดใหญ่และมีความร้อนสูง ฉะนั้นดวงอาทิตย์จะแผ่พลังงานออกมา มีสเปกตรัมความถี่กว้างมาก พลังงานนี้ปรากฏออกเป็นสัญญาณรบกวนคงที่ อย่างไรก็ตามที่ผิวดวงอาทิตย์ยังมีความแปรปรวนอื่น ๆ อีก เช่น จุดบนดวงอาทิตย์และการลุกโชนช่วง ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นอีก

3.) สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสิ่งประดิษฐ์ที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่สัญญาณรบกวนจากมอเตอร์ไฟฟ้า เช่น พัดลมที่เป่าลม เครื่องดูดฝุ่น นอกจากนี้ก็ยังมีสัญญาณรบกวนจากระบบจุดระเบิดของรถยนต์ การรั่วของสายไฟแรงสูง หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ฯลฯ

4.) สัญญาณรบกวนภายในตัวอุปกรณ์ แยกออกเป็น 2 ประเภท คือ Thermal Noise และ Shot Noise Thermal Noise เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวอุปกรณ์ บางครั้งเรียกว่า Johnson Noise ส่วน Shot Noise เกิดขึ้นในอุปกรณ์แอกติฟ ทุกชนิด เนื่องจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล เช่น ในทรานซิสเตอร์ ซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.2 รูปแบบของการสื่อสาร

รูปแบบของการติดต่อสื่อสารมีอยู่ 3 ระบบใหญ่ ๆ คือ

2.2.1 ระบบซิมเพล็กซ์ (Simplex System) ในการติดต่อสื่อสารแบบนี้ สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปได้ในทิศทางเดียวโดยสถานีหนึ่งจะเป็นตัวส่งผ่านสัญญาณ และอีกสถานีหนึ่งจะเป็นตัวรับสัญญาณ

2.2.2 ระบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (Half Duplex System) การทำงานของระบบช่องทางเดินสัญญาณแบบนี้ สถานีทั้ง 2 ฝ่ายสามารถที่จะส่งข้อมูลได้แต่จะต้องผลัดกัน คือมีเพียงสถานีเดียวที่ทำการส่งผ่านสัญญาณในเวลาใดเวลาหนึ่ง จะเป็นผ่านส่งสัญญาณพร้อม ๆ กันไม่ได้ เมื่อตัวหนึ่งส่งอีกตัวหนึ่งต้องรับ ในทางกลับกัน เมื่อตัวหนึ่งรับอีกตัวหนึ่งต้องส่ง

2.2.3 ระบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full Duplex System) เป็นระบบที่สถานีทั้งสอง

สถานีสามารถส่งและรับสัญญาณข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน

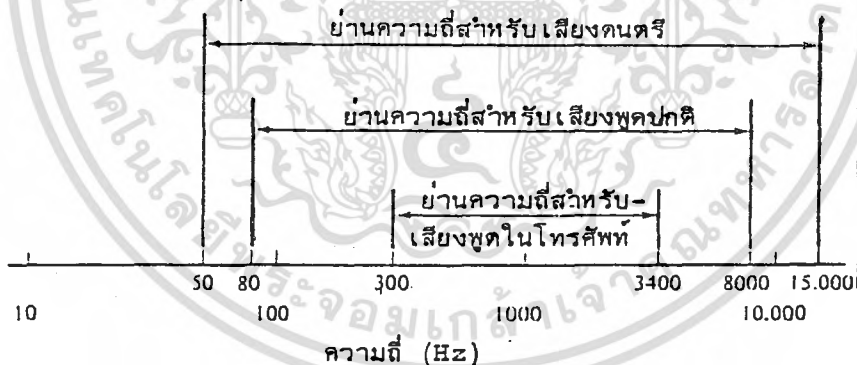
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สัญญาณข้อมูล

2.3.1 สัญญาณเสียง สัญญาณเสียงเป็นสัญญาณอินพุตหนึ่งของโครงงานนี้ ซึ่งลักษณะของเสียงหรือคุณภาพของเสียงพูดขึ้นอยู่กับจำนวนฮาร์โมนิกและแอมพลิจูดของสัญญาณ ย่านความถี่เสียงพูดถูกกำหนดโดยการทดลองฟังเสียงพูดของคนจำนวนมาก

1.) ย่านความถี่เสียงพูด ได้มีการทดลองเกี่ยวกับการฟังออก (Articulation Test) โดยใช้คนจำนวนหนึ่งบันทึกความชัดเจนของพยางค์ที่พูดผ่านลำโพงโดยการเปลี่ยนย่านความถี่ไปเรื่อย ๆ จากนั้นก็หาเปอร์เซ็นต์ในการฟังที่ชัดเจนของพยางค์ที่จดบันทึกในแต่ละช่วงที่ความถี่เปลี่ยนไป จำนวนของพยางค์ที่ฟังได้ถูกต้องต่อจำนวนพยางค์ทั้งหมดที่เปิดให้ฟัง เรียกว่า ประสิทธิภาพการฟังออก (Articulation Efficiency)

จากการวิเคราะห์ความถี่โดยตรงจากวงดนตรี ปรากฏว่าพลังงานเสียงจะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 15 ถึง 20,000 Hz ระบบที่เรียกว่า คุณภาพสูง (High - Fidelity) หรือ ไฮไฟ นั้นจะต้องมีคุณสมบัติต่ำสุดของช่วงกว้าง (Minimum Bandwidth) ความสูงต่ำสุดต่อความเพี้ยนของความถี่และความเพี้ยนต่ำสุดของความถี่ อย่างไรก็ตามระบบสเตอริโอจะมีช่วงกว้างความถี่จาก 50 ถึง 15,000 Hz



รูปที่ 2.2 แสดงย่านความถี่ต่าง ๆ ที่ใช้กับสัญญาณเสียง

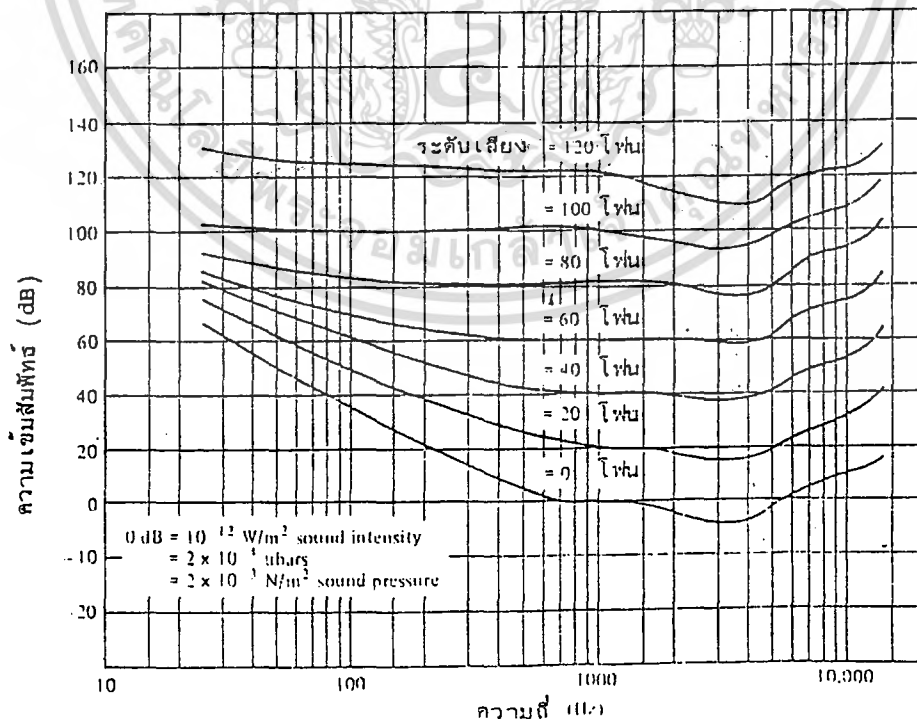
2.) ระบบความกดดันของเสียง เสียงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศ (Air Pressure) ต่อค่าเฉลี่ยของความดันอากาศปกติ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุในอากาศความถี่ในย่านการเปลี่ยนแปลงนี้เริ่มจาก 1 Hz ถึง หลาย ๆ ร้อยกิโลเฮิรตซ์ แต่หูของมนุษย์สามารถรับเสียงได้ดีจาก 16 Hz ถึง 16 kHz โดยประมาณเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงแรงดันสลับไปมาจากแหล่งกำเนิดเสียงจะทำให้เกิดคลื่นเสียงออก จากแหล่งกำเนิดนั้นเหมือนกับคลื่นที่เกิดขึ้นในน้ำเมื่อโยนก้อนหินลงไป คลื่นเสียงจะแผ่ กระจายไปด้วย ความเร็วที่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับตัวกลาง (อากาศ น้ำ โลหะ ฯลฯ) ที่ผ่านและ จะให้พลังงานออกมาคงที่ มีหน่วยเป็นวัตต์

กำลังเสียงของวงดนตรีจะมีหน่วยตั้งแต่ไมโครวัตต์ในกรณีที่เสียงแผ่เบาจนกระทั่ง เป็นหลาย ๆ วัตต์เมื่อเสียงดังมาก ๆ กำลังเสียงพูดของคนทั่ว ๆ ไป จะมีหน่วยเป็น ไมโครวัตต์เมื่อกระซิบ จนกระทั่งเป็นมิลลิวัตต์เมื่อตะโกน อย่างไรก็ตามความดังซึ่งเกิดจาก ความเข้มของเสียงสำหรับผู้ฟังนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของห้อง จุดที่ฟังและลำโพงด้วย ดัง นั้นเสียงที่เกิดขึ้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีเสียงดังเท่ากับเสียงเดิม สิ่งสำคัญก็คือ อัตราส่วนกำลัง (Power Ratio) เสียงทางค้ำพูดกับค้ำฟังต้องเท่ากัน เช่น ทางส่งมีช่วง กำลังระหว่าง 1 mW ถึง 10 W ทางค้ำฟังก็ต้องมีอัตราส่วนกำลัง $10^4:1$ ด้วย ถึงแม้กำลัง ที่ออกมาจะมีเพียง 10 μ W ถึง 100 mW

3.) ความเข้มเสียง (Sound Intensity) หมายถึงอัตราเฉลี่ยของการส่งพลังงานเสียงใน ทิศทางที่กำหนดให้ของพื้นที่ 1 ตารางเมตร และตั้งฉากกับทิศทางที่กำหนดให้ด้วย มีหน่วย เป็นวัตต์ต่อตารางเมตรและแปรตามแรงดันของเสียงกำลังสอง (Newton / Square Meter)



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดังกับความถี่

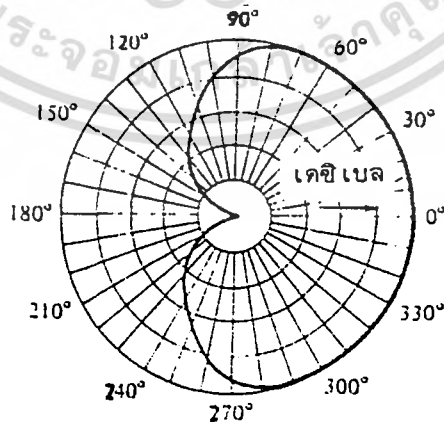
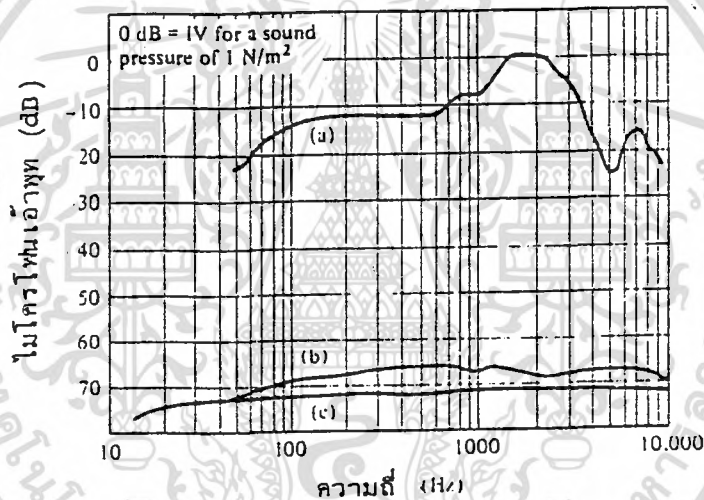
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หูเรามีความไวต่อเสียงมาก สามารถรับรู้เสียงที่มีความเข้มเพียง 10^{-13} W/m^2 ความไวในการรับเสียงจะไม่เท่ากันทุก ๆ ความถี่ รูปที่ 2.3 แสดงถึงการรับเสียงของหูเมื่อความถี่เปลี่ยนไป ความเข้มเสียงมีหน่วยเป็นเดซิเบล ซึ่งจะแปรตามความเข้มแบบลอการิทึม

อัตราส่วนกำลังระหว่างความเข้มสูงสุด และต่ำสุด คือ 10^{12} ความเข้มเสียงอ้างอิงที่ศูนย์เดซิเบลเท่ากับ 10^{-12} W/m^2 ที่ความถี่ 1000 Hz

4.) อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณข้อมูลเสียง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

(1.) ไมโครโฟน ไมโครโฟนทำหน้าที่เปลี่ยนแรงกดของอากาศให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีหลายแบบ เช่น แบบขดลวดเคลื่อนที่ (Moving Coil) , แบบอาศัยหลักการของเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) , แบบคอนเดนเซอร์ และคาร์บอนไมโครโฟน



รูปที่ 2.4 (a) แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของไมโครโฟน

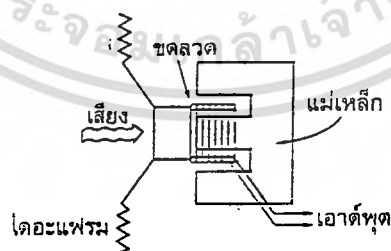
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (b) แสดงคุณสมบัติของไมโครโฟนจำกัดทิศทาง ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพของไมโครโฟนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายอย่าง เช่น ระดับสัญญาณออก มีหน่วยเป็นวัตต์ ซึ่งเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงของเสียง ที่มีความถี่ 1,000 Hz ใช้กับไมโครโฟนหรือระดับกำลังสัญญาณออกมาตรฐานมีหน่วยเป็นเดซิเบล ระดับกำลังนี้คือ ค่าความไวของไมโครโฟน

ผลของความถี่ วัตต์ระดับสัญญาณออกของไมโครโฟนชนิดต่าง ๆ ตามรูป 2.4 (a) โดยให้สัญญาณเข้าของทุกความถี่ที่ตลอดเวลา ไมโครโฟนอุดมคติจะต้องมีคุณสมบัติของความถี่เรียบตลอด ตั้งแต่ 16 Hz ถึง 20 kHz ไมโครโฟนที่ใช้จริง ๆ จะต่างจากนี้มาก ไมโครโฟนส่วนมากจะจำกัดทิศทางการรับ เหมือนกับคุณสมบัติการรับของสายอากาศในการวัดนี้จะวัดตามแนวนอนมากกว่าแนวตั้ง รูปที่ 2.4 (b) แสดงถึงทิศทางของไมโครโฟน ที่มีคุณสมบัติเหมือนรูปหัวใจ

- ไมโครโฟนแบบขดลวดเคลื่อนที่

โครงสร้างของไมโครโฟนแบบขดลวดเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 2.5 เมื่อมีคลื่นเสียงมาตกกระทบแผ่น ไดอะแฟรมทำให้ไดอะแฟรมเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ขดลวดที่อยู่ภายในเกิดการเคลื่อนที่ที่ตัดสนามแม่เหล็กเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันขึ้นซึ่งขนาดของแรงดันนั้นก็ขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของขดลวดอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากกำลังของเสียงที่เข้ามากระทบแผ่นไดอะแฟรม ไมโครโฟนแบบนี้ จะให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตค่อนข้างต่ำ คือไม่กี่มิลลิโวลต์และมีอิมพีแดนซ์ต่ำประมาณไม่กี่ร้อย โอห์มแต่ให้สัญญาณ ที่มีคุณภาพค่อนข้างมาก คือ มีความเพี้ยนต่ำนั่นเอง



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของไมโครโฟนแบบขดลวดเคลื่อนที่

- ไมโครโฟนแบบอาศัยหลักการของเปียโซอิเล็กทริก

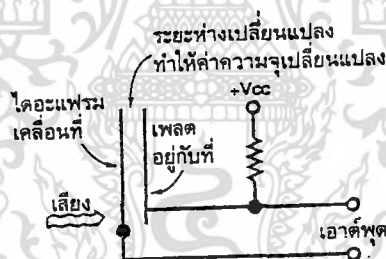
ไมโครโฟนแบบนี้จะทำงานภายใต้ปรากฏการณ์ของเปียโซอิเล็กทริก

คือ หากเกิดแรงกดหรือตบกระทบบนตัวทรานสดิวเซอร์ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นหรืออาจเรียกไมโครโฟนแบบนี้ว่า คริสตัลไมโครโฟน ไมโครโฟนแบบนี้มีอิมพีแดนซ์สูงมาก มีค่าเป็นเมกะโอห์ม ให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตประมาณ 0.5 โวลต์ แต่คุณภาพของสัญญาณที่ได้ยังไม่ดีนัก

- ไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์

มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.6 ใช้หลักการที่ว่า เสียงมาตบกระทบบน

ไดอะแฟรม ทำให้แผ่นเพลตเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ความจุภายในเกิดการเปลี่ยนแปลง แผ่นเพลตที่ทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุต่อเข้ากับแรงดันไฟตรง โดยผ่านตัวต้านทาน เมื่อความจุไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง แรงดันตกคร่อมย่อมเปลี่ยนตามไปด้วย จึงเกิดสัญญาณไฟฟ้าออกมาจากเอาต์พุต ไมโครโฟนแบบนี้ให้คุณภาพของเสียงค่อนข้างดี ให้เอาต์พุตแรงเหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของมัน แต่มีข้อเสียคือ ต้องมีแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงตลอดเวลา



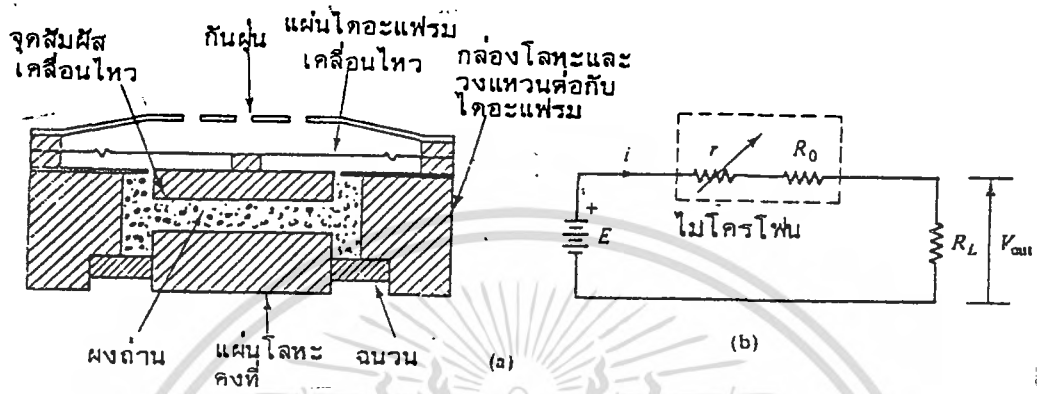
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของไมโครโฟนแบบคอนเดนเซอร์

- คาร์บอนไมโครโฟน

ใช้เป็นเครื่องส่งในหูฟังโทรศัพท์ เป็นไมโครโฟนชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน มีคุณสมบัติต่อความถี่จำกัด แต่มีลักษณะที่แน่นหนาทนทานมาก รูป 2.7 (a) แสดงถึงรูปหน้าตัดของคาร์บอนไมโครโฟน มีแผ่นไดอะแฟรมวางขวางอยู่ เมื่อแผ่นนี้เคลื่อนที่ก็จะทำให้ความต้านทานของผงถ่านเปลี่ยนไปตามแรงอัดของอากาศทำให้กระแสไหลในวงจรนี้เปลี่ยนไปเมื่อต่อเข้ากับแบตเตอรี่ ปัญหาของไมโครโฟนแบบนี้คือ ความเพี้ยน ความต้านทานของไมโครโฟนนี้จะแปรตามแรงอัดอากาศ แต่กระแสที่ไหลในวงจรจะแปรผันกันทำให้โวลต์เดจที่ตกคร่อมแปรผกผันกับแรงอัดอากาศ ไมโครโฟนแบบนี้จะมีขนาดเล็ก ราคาถูก ทนทาน และมีสัญญาณออกที่แรง จึงเหมาะสมที่จะใช้กับหูโทรศัพท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

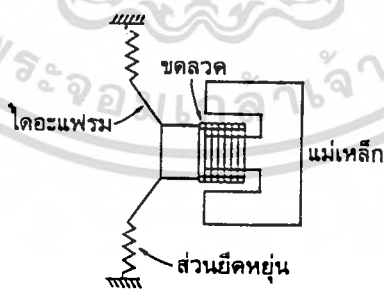
หรือวิทยุเล็ก ๆ สำหรับไมโครโฟนแบบแม่เหล็กนั้น ไม่ต้องมีแบตเตอรี่สำหรับการทำงานแต่มีสัญญาณออกต่ำ



รูปที่ 2.7 (a) แสดงรูปหน้าตัดของคาร์บอนไมโครโฟน

(b) แสดงวงจรสมมูลย์ของคาร์บอนไมโครโฟน

(2.) ลำโพง (Loud Speaker) ลำโพงเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง ดังรูปที่ 2.8 เป็นโครงสร้างของลำโพงแบบขดลวดเคลื่อนที่อันเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของลำโพงแบบขดลวดเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างขั้วแม่เหล็กถาวรสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะทำให้มีกระแสไหลในขดลวด และเกิดแรงที่ทำให้แผ่นโคอะเฟรมเคลื่อนที่ จากการเคลื่อนที่เข้าออกของแผ่นโคอะเฟรมนี้เอง จึงเกิดคลื่นเสียงกระจายออกจากตัวลำโพง ในลำโพงที่ถูกออกแบบมาอย่างถูกต้องและดีเยี่ยม คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาทุกประการ

2.3.2 สัญญาณภาพ สัญญาณภาพเป็นสัญญาณข้อมูลที่ใช้เป็นอินพุตหนึ่งของโครงการนี้ ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาได้ดังนี้

1.) ระบบสัญญาณโทรทัศน์ ปัจจุบันระบบสัญญาณโทรทัศน์ที่ใช้กันมีอยู่ 3 ระบบ

(1.) NTSC (The National Television System Committee) เป็นระบบที่เกิดขึ้นก่อนระบบอื่น ๆ ซึ่งถือเป็นระบบแม่ (The Mother of All CTV System)

(2.) SECAM (Sequential Colour with Memory or Sequential a Memory) เป็นระบบที่พัฒนาจากระบบ NTSC เพื่อแก้ความคลาดเคลื่อนทางสี

(3.) PAL (Phase Alternation Line) เป็นอีกระบบหนึ่งที่แก้ไขข้อผิดพลาดของระบบ NTSC และเป็นระบบที่ใช้ในประเทศไทย

สำหรับในโครงการนี้จะกล่าวถึงเฉพาะระบบ PAL เท่านั้นเนื่องจากเป็นระบบที่ใช้ในประเทศไทยมีรายละเอียดของระบบที่ควรจะทราบดังนี้

จำนวนเส้นต่อเฟรมภาพ 625 เส้น

จำนวนเฟรมภาพต่อวินาที 25 ภาพ

จำนวนฟิลด์ภาพต่อวินาที 50 ฟิลด์

ความถี่หักเหแนวอน 15.625 Hz

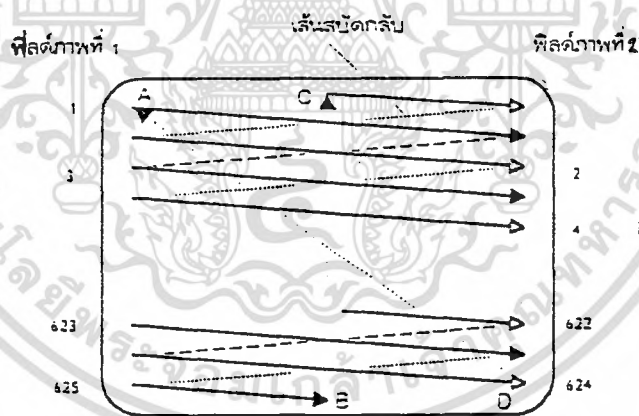
2.) การกวาดสัญญาณภาพ สัญญาณภาพระบบ PAL เป็นระบบภาพ 625 เส้น อัตราภาพ 25 เฟรมภาพ/วินาที โดยใน 1 เฟรมภาพจะประกอบด้วย 2 ฟิลด์ภาพ(Field) ฟิลด์ภาพที่ 1 เป็นฟิลด์ภาพคี่ จะประกอบด้วยเส้นกวาดอันดับคี่และฟิลด์ภาพที่ 2 เป็นฟิลด์ภาพคู่ จะประกอบด้วยเส้นกวาดอันดับคู่ ดังนั้น ใน 1 ฟิลด์ภาพจะประกอบด้วยเส้นกวาดจำนวน $625/2 = 312.5$ เส้นกวาด

การกวาดภาพให้ไครบ 1 เฟรมภาพที่สมบูรณ์นั้น จะเริ่มจากการกวาดในฟิลด์ภาพที่ 1 ที่มุมซ้ายบนของจอภาพ กวาดมาทางขวาจนสุดจอภาพจากนั้นจะสลับกลับมาเริ่มต้นกวาดเส้นใหม่ทางด้านซ้ายของจอภาพ เนื่องจากช่วงสลับเส้นกลับนี้เป็นช่วงที่ไม่มีข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท ทรูวิชั่นส์ จำกัด (มหาชน) ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ ได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท ทรูวิชั่นส์ จำกัด (มหาชน) ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ ได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท ทรูวิชั่นส์ จำกัด (มหาชน) ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ ได้

ทำการดับเส้นสลับกลับในช่วงนี้ เรียกว่า สัญญาณแบลกกิ่งแนวนอน หรือ H.blank (Horizontal Blanking) และในช่วงนี้จะปรากฏสัญญาณอีกตัวหนึ่ง คือ สัญญาณซิงค์แนวนอน หรือ H.sync (Horizontal Sync) ซึ่งเป็นสัญญาณที่กระตุ้นให้เกิดการสลับกลับดังที่กล่าวมาแล้วนั่นเอง จากนั้นก็จะกวาดเส้นต่อไปเรื่อยๆจนสุดที่ส่วนล่างของจอภาพ เป็นการสิ้นสุดการกวาดภาพในฟิลด์ภาพที่ 1

หลังจากฟิลด์ภาพที่ 1 กวาดครบ เส้นก็จะสลับกลับขึ้นไปทางด้านบนของจอภาพเช่นกัน ช่วงสลับกลับขึ้นไปด้านบนเส้นก็จะถูกดับทิ้งโดยสัญญาณที่เรียกว่า สัญญาณแบลกกิ่งแนวตั้ง หรือ V.blank (Vertical Blanking) และภายในสัญญาณนี้ก็มีสัญญาณที่กระตุ้นให้เกิดการสลับกลับเรียกว่า สัญญาณซิงค์แนวตั้ง หรือ V.sync (Vertical Sync) จากนั้นก็จะกวาดเส้นต่อไป ซึ่งจะกวาดลงแทรกเส้นทุกเส้นที่กวาดโดยฟิลด์ภาพที่ 1 จนครบฟิลด์ภาพที่ 2 เป็นอันครบ 1 เฟรมภาพสมบูรณ์ ข้อดีของการกวาดเส้นในลักษณะนี้คือ ภาพที่ได้บนจอภาพจะไม่กระพริบ เรียกการกวาดตามกระบวนการที่กล่าวมานี้ว่า การกวาดสัญญาณแบบสลับเส้น (Interlace Scanning)



รูปที่ 2.9 แสดงการกวาดแบบสลับเส้น (Interlace Scanning)

3.) สัญญาณภาพระบบ PAL (PAL Video Signal Format) มาตรฐานรูปคลื่นของสัญญาณภาพระบบ PAL แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

(1.) สัญญาณลูมิแนนซ์ (Luminance Signal) เป็นสัญญาณความสว่างของภาพ (ถ้าเป็นสัญญาณภาพสีจะมีสัญญาณ โครมิแนนซ์ หรือ สัญญาณสีด้วย) เป็นสัญญาณส่วนที่นำไปแสดงบนจอภาพจริง ๆ (ส่วนอื่น ๆ จะถูกดับทิ้งทั้งหมดด้วยสัญญาณแบลกกิ่ง)

เอกสารนี้เป็นสัญญาณภาพขาว-ดำ สัญญาณลูมิแนนซ์จึงกำหนดเพียงความสว่างของแต่ละจุดคร่าวๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละเส้นที่กวาดโดยกำหนดให้ระดับความสว่างสุดมีขนาดเป็น 100 IRE เมื่อเทียบกับระดับ 0 IRE ที่ระดับเบลงกิ้ง ดังในรูปที่ 2.11 และระดับมืดสุดอยู่ที่ระดับ 7.5 IRE โดยกำหนดให้ $1\text{IRE} = 0.0215\text{ V}$ คาบของสัญญาณมีค่าโดยประมาณ 53.1 μs

(2.) สัญญาณซิงค์ เป็นสัญญาณที่กระตุ้นให้วงจรภายในเครื่องรับโทรทัศน์ สะบัดเส้นกลับมี 2 สัญญาณ คือ สัญญาณซิงค์แนวนอน และสัญญาณซิงค์แนวตั้ง

- สัญญาณซิงค์แนวนอน เป็นส่วนที่กระตุ้นให้มีการสะบัดเส้นกวาดกลับมา ด้านซ้ายของจอภาพเพื่อจะเริ่มต้นกวาดเส้นใหม่ จากรูปที่ 2.10 ถ้าสังเกตดูแล้วจะเห็นว่า สัญญาณซิงค์แนวนอนนอกจากจะปรากฏในทุก ๆ ช่วงการกวาดเส้นแนวนอนแล้วยังปรากฏ ในช่วงสัญญาณเบลงกิ้งแนวตั้งด้วย (ส่วนอิตวอไลซ์ และส่วนซิงค์แนวตั้ง) ซึ่งสัญญาณซิงค์ ในส่วนนี้ใช้เพื่อทำให้วงจรกวาดเส้นแนวนอนในเครื่องรับโทรทัศน์อยู่ในสภาพซิงโครไนซ์ ในขณะที่อยู่ในช่วงเบลงกิ้งแนวตั้งซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการผิดเพี้ยนบริเวณขอบบนของจอภาพ ระดับซิงค์มีระดับต่ำกว่าระดับเบลงกิ้งอยู่ 40 IRE มีคาบประมาณ 4.7 μs

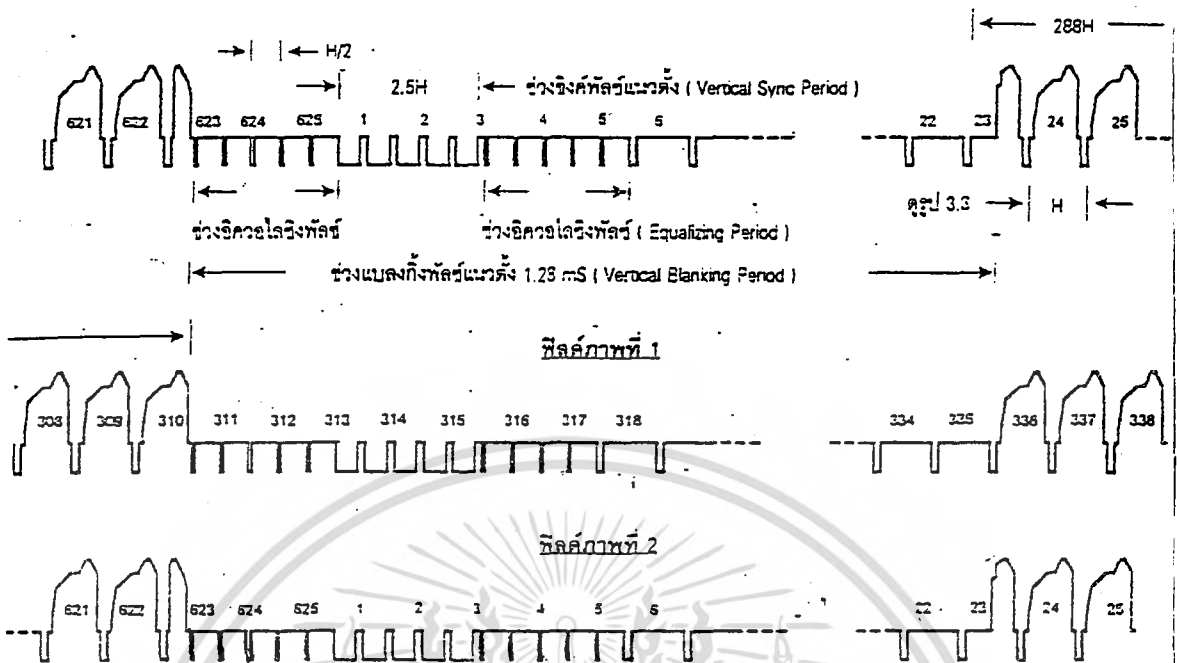
- สัญญาณซิงค์แนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 2.10 เป็นส่วนที่กระตุ้นให้มีการสะบัดเส้นกลับขึ้นไปด้านบนของจอภาพเพื่อกวาดฟิลด์ภาพใหม่ จากรูปจะเห็นว่ารูปคลื่นในช่วงซิงค์แนวตั้งจะมีค่า Duty cycle ต่ำกว่าทุก ๆ ช่วงในฟิลด์จึงทำให้วงจรภายในเครื่องรับโทรทัศน์สามารถตรวจพบได้

(3.) สัญญาณเบลงกิ้ง เป็นสัญญาณส่วนที่กระตุ้นให้เกิดการดับเส้นกวาดบนจอภาพในขณะที่กำลังสะบัดเส้นกลับมี 2 สัญญาณ คือ สัญญาณเบลงกิ้งแนวนอน และสัญญาณเบลงกิ้งแนวตั้ง

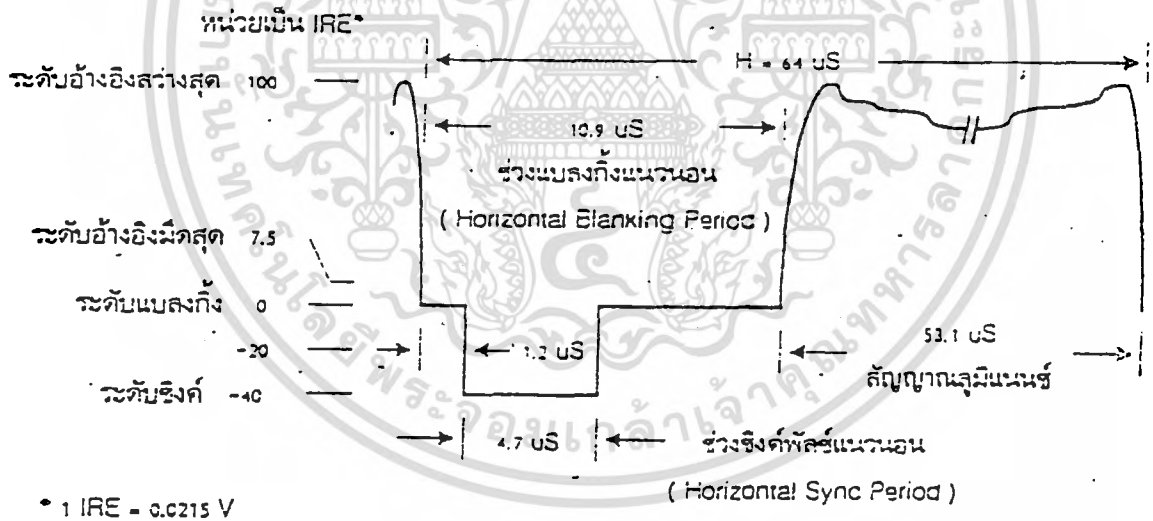
- สัญญาณเบลงกิ้งแนวนอน (Horizontal Blanking) ทำหน้าที่ดับเส้นสะบัดกลับในแนวนอน ดังรูปที่ 2.10 มีระดับต่ำกว่า 7.5 IRE มีคาบประมาณ 10.9 μs

- สัญญาณเบลงกิ้งแนวตั้ง (Vertical Blanking) ทำหน้าที่ดับเส้นสะบัดกลับในแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งมีคาบกว้างถึงประมาณ 1.28 ms จะเห็นว่าในช่วงนี้ประกอบไปด้วย ช่วงอิตวอไลซ์ซึ่งเป็นซิงค์แนวนอนใช้ในการซิงโครไนซ์กับวงจรถูกกวาดในเครื่องรับโทรทัศน์ สัญญาณตลอดช่วงนี้จะมีระดับต่ำกว่า 7.5 IRE ทั้งสิ้น





รูปที่ 2.10 แสดงรายละเอียดสัญญาณภาพมาตรฐาน PAL

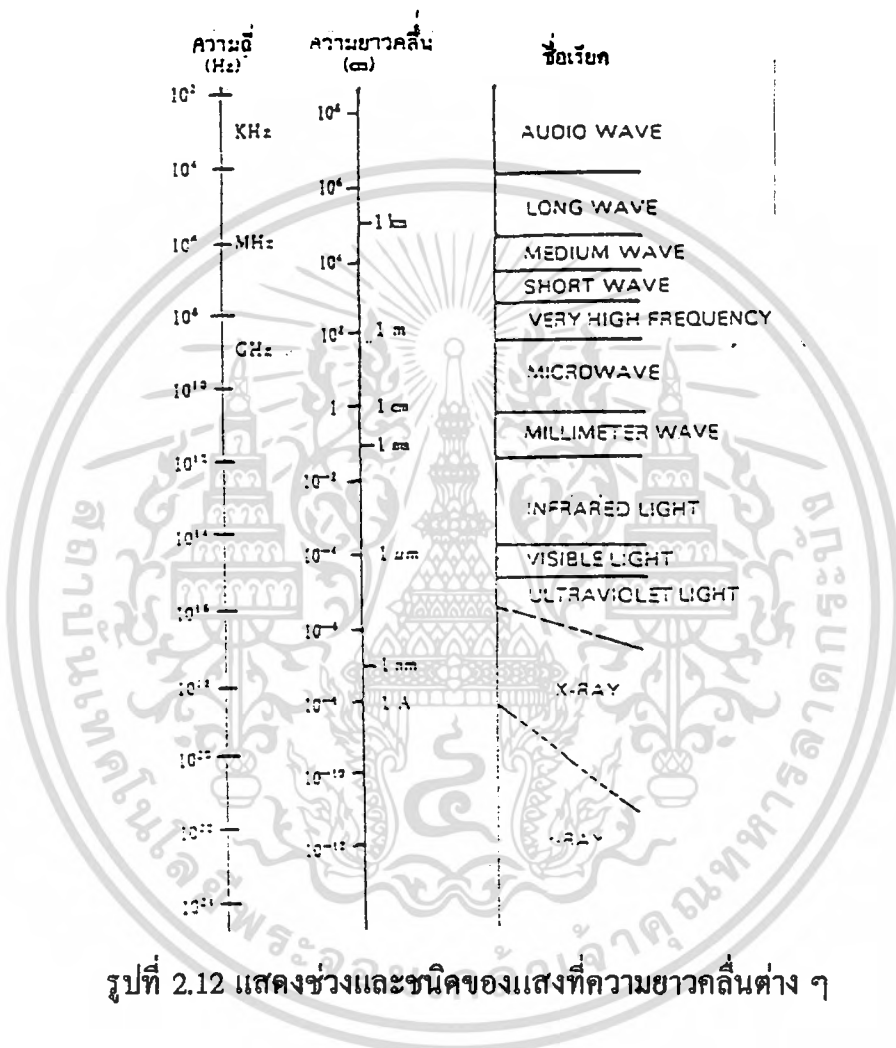


รูปที่ 2.11 แสดงรายละเอียดใน 1 เส้นกวาดแนวนอนซึ่งประกอบด้วยสัญญาณชิงคัพพัลส์ แบลนคิง และลูมิแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีและหลักการทางแสงและเส้นใยนำแสง

2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานทางแสง แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กชนิดหนึ่ง แบ่งออกได้หลายชนิดตามความยาวคลื่นและช่วงความถี่ดังรูป



รูปที่ 2.12 แสดงช่วงและชนิดของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

แสงที่ตามนุษย์มองเห็นเรียกว่า Visible Light มีความยาวคลื่น 0.4 μm - 0.7 μm แสงโดยทั่ว ๆ ไปมักมีความยาวคลื่นหลายช่วงปนกันอยู่เช่น แสงจากดวงอาทิตย์ที่เห็นเป็นแสงขาวถ้าทำการวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมจะได้ช่วงแสงที่แยกออกเป็น 7 สี (คล้ายสีรุ้งกินน้ำ) แต่ถ้าเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในทางการสื่อสารเช่น เลเซอร์ไดโอด ,LED อุปกรณ์พวกนี้จะมีแสงที่มีสีเดียว เส้นสเปกตรัมเพียงเส้นเดียวและถ้าเป็นชนิดที่มีคุณภาพดีขนาดของเส้นสเปกตรัมจะแคบมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) กฎพื้นฐานทางแสง สามารถพิจารณาหลักการสำคัญ ๆ ได้ดังนี้

(1.) ในสุญญากาศแสงเดินทางด้วยความเร็ว 3×10^8 m/s ในตัวกลางอื่น ๆ มีความเร็วดังสูตร

$$v = c/n$$

v คือความเร็วแสงในตัวกลาง m/s

c คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ m/s

n คือค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง

ในอากาศค่าดัชนีหักเหมีค่าประมาณ 1 ดังนั้นในอากาศ แสงจึงมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วของแสงในสุญญากาศ

MATERIAL	INDEX OF REFRACTION
Air	1
Carbon dioxide	1
Ethyl alcohol	1.36
Water	1.33
Fused silica	1.46
Glass	1.5
Polystyrene	1.59
Silicon	3.5
Germanium	4
Sapphire	1.8
Calcite	1.6
Sodium chloride	1.54
Magnesium fluoride	1.38
Zinc sulfide	2.3
Gallium arsenide	3.35
Aluminum gallium arsenide	3.6

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่าง ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.) แสงเดินทางเป็นเส้นตรง ยกเว้นเมื่อมีการเปลี่ยนตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

(3.) ที่รอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน มุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน(กฎการสะท้อน)

(4.) กฎของสเนลล์(Snell 's Law) ปฏิกิริยาการหักเหของแสงจะเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่ง (ซึ่งมีค่าดัชนีเป็น n_1) ไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง (ซึ่งมีค่าดัชนีเป็น n_2) โดย $n_1 \neq n_2$ แยกพิจารณาออกได้เป็น 2 กรณี

- กรณี $n_1 > n_2$ โดยแสงเดินทางจากตัวกลาง (n_1) ไปยังตัวกลาง (n_2) พบว่าเมื่อเพิ่มมุมตกกระทบ แสงที่เกิดจากการหักเหจะเบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติมากขึ้นเรื่อย ๆ และมุมที่เกิดจากการหักเหมักมีค่ามากกว่ามุมตกกระทบซึ่งสามารถอธิบายด้วยกฎของสเนลล์ได้ดังนี้

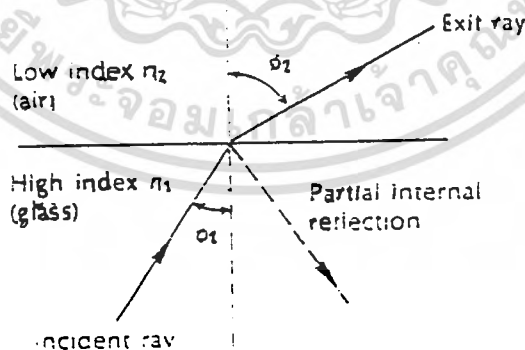
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

หรือ $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1$

เมื่อ θ_1 คือมุมตกกระทบของรังสี

θ_2 คือมุมหักเหของรังสี

θ_3 คือมุมสะท้อนของรังสี



รูปที่ 2.13 แสดงการเดินทางของแสงผ่านตัวกลาง (n_1) ไปตัวกลาง (n_2) ; $n_1 > n_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค่า θ_1 มีค่ามากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วแสงจะไม่สามารถเดินทางเข้าไปในตัวกลาง(n_2)ได้เลย คือเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดโดยมุมตกกระทบ θ_1 ที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดเรียกว่า มุมวิกฤต (Critical Angle, θ_c) ดังนั้นถ้าให้มุมวิกฤตเป็น θ_c และมุมหักเหเป็น θ_2 มีค่าเท่ากับ 90° จะได้

$$\sin \theta_c = \sin \theta_2 = \sin 90^\circ = 1$$

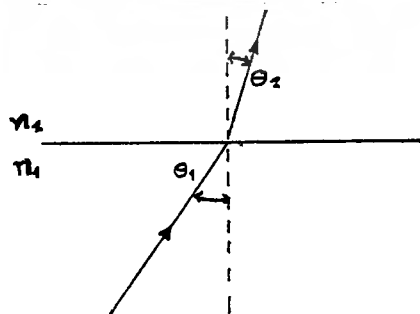
ดังนั้นกฎของสเนลล์ในกรณีการเกิดการสะท้อนกลับหมดจะเป็น

$$\sin \theta_c = n_2/n_1$$

รูปที่ 2.14 แสดงทางเดินของแสงที่มุมวิกฤต

- กรณี $n_1 < n_2$ โดยแสงเดินทางจากตัวกลาง (n_1) ไปยังตัวกลาง (n_2) เมื่อเพิ่มค่ามุมตกกระทบมากขึ้นและแสงที่หักเหจะเบนเข้าหาเส้นปกติมากขึ้น พบว่ามีลักษณะตรงกันข้ามกับกรณีที่ ($n_1 > n_2$)

สำหรับการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงคือกรณีแรก ($n_1 > n_2$) โดยใช้ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดที่ทำให้แสงเดินทางผ่านเส้นใยนำแสง



รูปที่ 2.15 แสดงทางเดินของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลาง (n_1) ไปตัวกลาง (n_2) ; $n_1 < n_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 เส้นใยนำแสง เส้นใยนำแสง คือ เส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยนำแสงประกอบด้วยส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า Core และส่วนที่หุ้ม Core อยู่เรียกว่า Cladding ทั้ง Core และ Cladding เป็น Dielectric โส 2 ชนิด (Dielectric หมายถึงสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แก้ว พลาสติก) โดยการทำให้ค่าดัชนีการหักเหของ Cladding มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการหักเหของ Core เล็กน้อยประมาณ 0.2-3% และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง สามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปใน Core เดินทางไปได้ เนื่องจากกล่าวกันว่าเส้นใยนำแสงมีขนาดเล็กมากหมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางด้านนอกของ Cladding ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.1 มม. ส่วน Core ที่แสงเดินทางผ่านนั้นมีขนาดเล็กลงไปอีก ค่าต่าง ๆ เหล่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นจากลักษณะสมบัติที่เด่นทั้งเชิงกลและในการส่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความทนทานต่อเสียงรบกวน (Noise Immunity) มีการสูญเสียน้อย (Low Loss) และมีแถบความถี่กว้าง ทำให้เหมาะที่จะใช้ในการสื่อสารในระยะทางไกลและมีความจุสูง (High Capacity) จึงเหมาะที่จะใช้ในสถานะแวดล้อมของการสื่อสารที่มีเสียงรบกวนมากและต้องการแถบความถี่กว้าง เช่น ใช้เป็นเคเบิลการสื่อสารสำหรับการไฟฟ้า การรถไฟ ระบบเคเบิลใต้น้ำ การสื่อสารคอมพิวเตอร์ การส่ง TV และ CATV เป็นต้น

ดังในตาราง

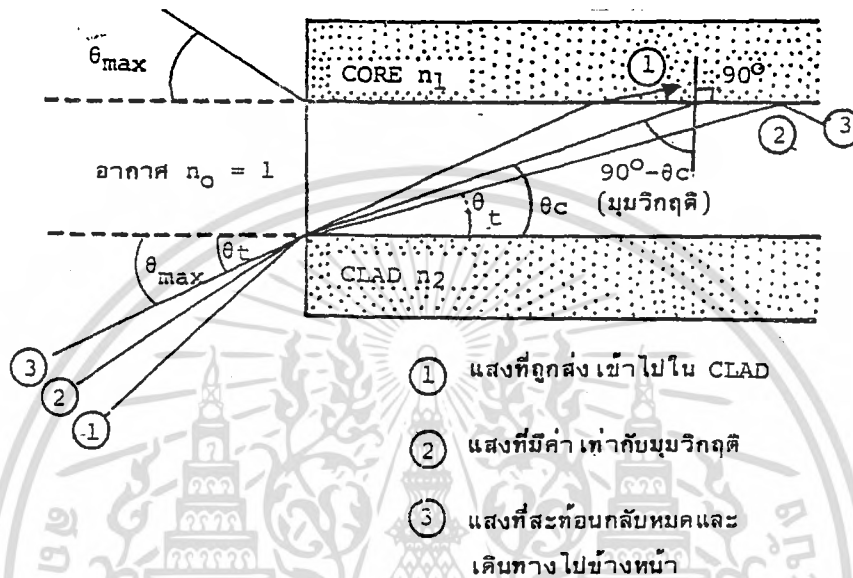
คุณสมบัติของเส้นใยนำแสง	เปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติ	ข้อดีของเส้นใยนำแสง	การประยุกต์ใช้งาน
ลักษณะสมบัติเชิงกล	1.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก 2.น้ำหนักเบา 3.ความคล่องตัวสูง	1.เปลืองที่น้อย 2.ทำเคเบิลเส้นใยนำแสงหลายแกนได้ 3.ติดตั้งได้ง่าย	1.วงจร trunk 2.วงจร subscriber 3.การส่งระหว่างสำนักงาน 4.เคเบิลการสื่อสารสำหรับการไฟฟ้าและการรถไฟ 5.ระบบเคเบิลใต้น้ำ
ลักษณะสมบัติของการส่ง	1.ทนทานต่อเสียงรบกวน 2.การสูญเสียน้อย 3.แถบความถี่กว้าง	1.ช่วงเครื่องทวนสัญญาณไกล 2.สายส่งมีความจุสูง	1.ส่งโทรทัศน์ 2.CATV 3.บัสข้อมูล 4.การต่อสายทางคอมพิวเตอร์ 5.เครื่องบิน

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

2.4.3 ลักษณะการเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง ปัญหาอันดับแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถป้อนแสงเข้าไปใน Core ที่มีขนาดเล็กมากของเส้นใยนำแสงได้ และเมื่อป้อนแสงเข้าไปแล้ว แสงนั้นจะเดินทางอย่างไรใน Core ซึ่งเราจะทำการศึกษาถึงปัญหาพื้นฐานเหล่านี้

1.) การป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง เนื่องจากว่าแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้น จะกระจายกว้างออกเนื่องจากปรากฏการณ์เบี่ยงเบนของแสง ในการที่จะป้อนแสงเข้าไปใน Core ที่มีขนาดเล็กมากนั้นต้องใช้เลนส์ในการรวมแสง แต่ที่ว่าแสงที่รวมนั้น ไม่ใช่ว่าจะถูกป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ทั้งหมด แสงที่มีมุมตกกระทบที่

เหมาะสมเท่านั้นจึงจะสามารถเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ รูปที่ 2.16 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง จากรูปจะเห็นว่าที่จุดป้อนแสงของเส้นใยนำแสงนั้นจะเป็นจุดต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน 3 ชนิด



รูปที่ 2.16 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง

ตัวกลางทั้ง 3 ชนิดนี้คือ อากาศ Core ของเส้นใยนำแสง และ Cladding ของเส้นใยนำแสงถ้าให้ค่าดัชนีหักเหของแสงของตัวกลางทั้ง 3 ชนิดเป็น n_0 ($n_0=1$), n_1 และ n_2 ตามลำดับจะเกิดการหักเห, การสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของอากาศกับ Core และ Core กับ Cladding ในที่นี้ให้มุมรับแสงของเส้นใยนำแสงที่มีค่ามากที่สุดเป็น θ_{max} จากรูปที่ 2.16 จะเห็นว่า ลำแสง 2 นั้น มุมรับแสงตรงรอยต่อของ Core กับ Cladding นั้นมีค่าเป็นมุมวิกฤติ (Critical Angle) ตรงรอยต่อของอากาศกับ Core และของ Core กับ Cladding นั้น จากกฎของสเนลล์จะได้ว่า

$$\sin \theta_{max} = n_1 \sin \theta_c$$

$$\sin (90^\circ - \theta_c) = \cos \theta_c = n_2/n_1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

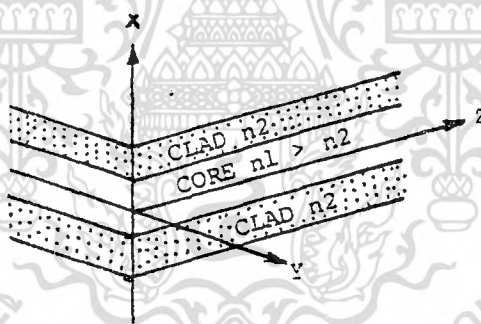
ดังนั้นกรณีที่มุมรับแสง θ_{\max} มีค่าสูงสุดได้นั้น $n_1 \approx n_2$ จากสมการทั้งสอง จะได้ว่า

$$\sin \theta_{\max} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

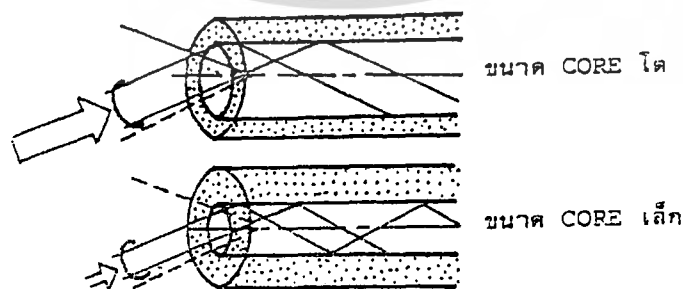
$$\text{ในที่นี้ } \Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$$

เรียกว่า อัตราส่วนของผลต่างของดัชนีการหักเหของแสง

สำหรับ $\sin \theta_{\max}$ นี้ตามศัพท์เทคนิคของวิชาแสงเรียกว่า Numerical Aperture เขียนย่อว่า "NA" หมายถึงขนาดของการเปิดรับให้แสงผ่าน และใช้เป็นตัวแสดงเงื่อนไขการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง นอกจากนั้นยังถือเป็นตัวประกอบพื้นฐานอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสง ระหว่างต้นกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสงด้วย ยกตัวอย่างเช่น สมมติว่าเส้นใยนำแสงมี $n_1=1.475$ และ $n_2 = 1.46$ (ค่าอัตราส่วนผลต่างของดัชนีหักเหของแสง = 1%) ในกรณีนี้มีค่า NA = 0.21 รูปที่ 2.17 แสดงความหมายของ NA และขนาดของ Core ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสง



(a) กรณี Core โดเท่ากันแต่ค่า NA ต่างกัน



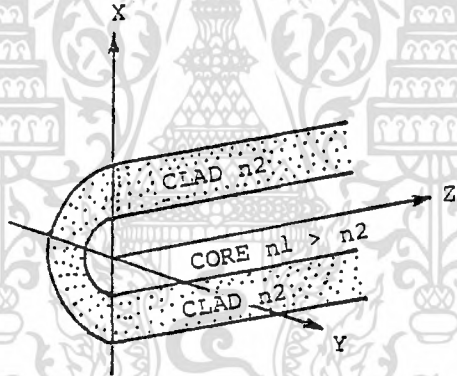
(b) กรณี ค่า NA เท่ากันแต่ขนาด Core ต่างกัน

รูปที่ 2.17 แสดงผลของ NA และขนาดของ Core ที่มีต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสง

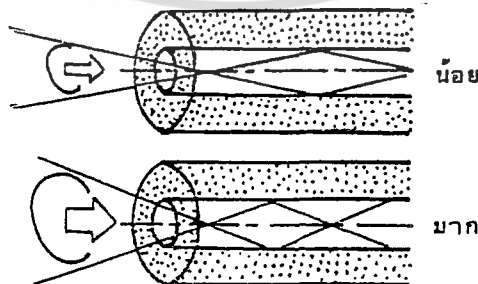
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นว่าถ้าหากขนาดของ Core และ NA มีค่าคงที่แล้วจะกำหนดปริมาณของแสงที่ป้อนเข้าไปใน Core ได้ทันที เส้นใยนำแสงที่มี Core ขนาดใหญ่และมีค่า NA มากจะมีประสิทธิภาพการเชื่อมต่อแสงระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสงสูงมาก

2.) Mode การเดินทางของแสงภายในเส้นใยนำแสง (Propagation Mode) แสงที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสงด้วยค่าของมุมรับแสงที่อยู่ในช่วงของมุมรับแสงสูงสุดนั้นแสงจะเดินทางในเส้นใยนำแสงด้วยลักษณะที่เกิดการสะท้อนกลับไปมาตรงรอยต่อของ Core กับ Cladding โดยที่สะท้อนกลับไปมาและเคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมกันด้วย แต่ทว่าจาก Interference ของแสงภายใน Core นั้น มุมสะท้อนกลับ ที่รอยต่อจะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องมีเงื่อนไขที่เหมาะสมเกี่ยวกับเงื่อนไขที่เหมาะสมนี้จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไปนี้ และเพื่อช่วยให้เป็นการเข้าใจได้ง่ายจะใช้เส้นใยนำแสงที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแบนดังแสดงในรูปที่ 2.18 (b) และลักษณะเส้นใยนำแสงที่มีรูปร่างกลมแสดงดังรูปที่ 2.18 (a) และจะพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าเท่านั้น



(a) ท่อนำคลื่นแบบกลม



(b) ท่อนำคลื่นแบบแบน

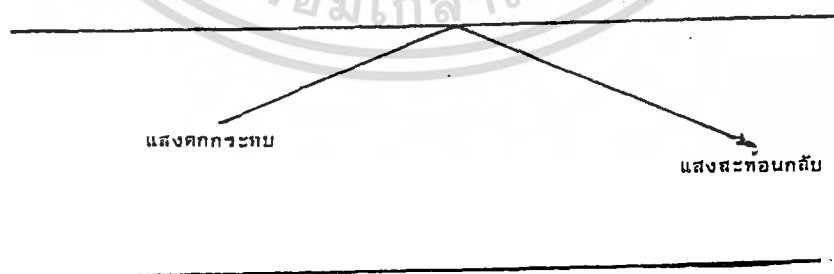
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.18 แสดงเส้นใยนำแสงแบบกลมและแบบระนาบแบน ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.) Interference ของแสงตกกระทบและแสงสะท้อนกลับ แสงที่สะท้อนกลับตรงรอยต่อของตัวกลางแสดงด้วยลำแสงดังรูปที่ 2.19 (a) และลำแสงนี้เป็นเสมือนตัวแทนของทิศทางเดินของแสงที่สนามไฟฟ้าของมัน มีการเปลี่ยนแปลงตามจุดต่าง ๆ ใน Core ของเส้นใยนำแสง รูปที่ 2.19 (b) แสดงการพิจารณาถึงระนาบที่มีเฟสเหมือนกันของสนามไฟฟ้า ซึ่งระนาบที่มีเฟสเหมือนกันของแสงตกกระทบและของแสงสะท้อนกลับจะซ้อนกัน (เป็นไปตามปรากฏการณ์ของการเกิดคลื่นอยู่กับที่) ดังนั้นแสงตกกระทบและแสงสะท้อนกลับจะเกิดการ Interference กันที่จุดต่าง ๆ ใน Core

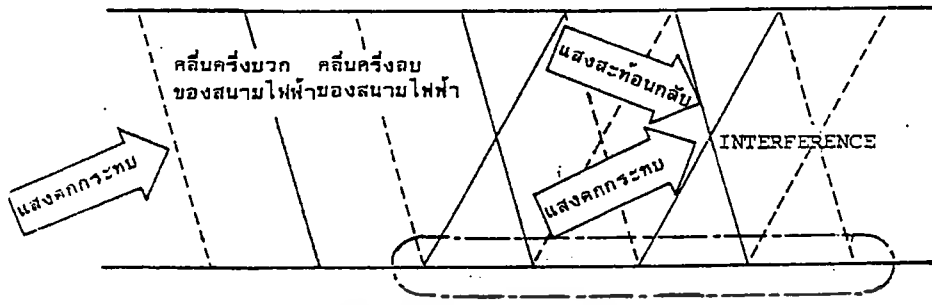
(2.) เงื่อนไขที่รอยต่อของตัวกลาง แสงที่สะท้อนกลับหมดที่รอยต่อของตัวกลางพร้อมทั้งเส้นทางไปด้วยนั้น สนามไฟฟ้าของแสงจำเป็นต้องอยู่ภายใน Core ด้วย ดังนั้นที่รอยต่อของตัวกลาง, ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการ Interference ของแสงตกกระทบและแสงสะท้อนกลับจะต้องเป็นศูนย์ด้วย

แต่เนื่องจากเส้นใยนำแสงที่ผลิตขึ้นมานั้น $n_1 \approx n_2$ ดังนั้นจะมีสนามไฟฟ้าจำนวนหนึ่งปรากฏที่ Cladding ด้วยเหมือนกันแต่สำหรับในที่นี้เพื่อให้การอธิบายง่ายขึ้นจึงสมมติว่าสนามไฟฟ้าที่ Cladding เป็นศูนย์

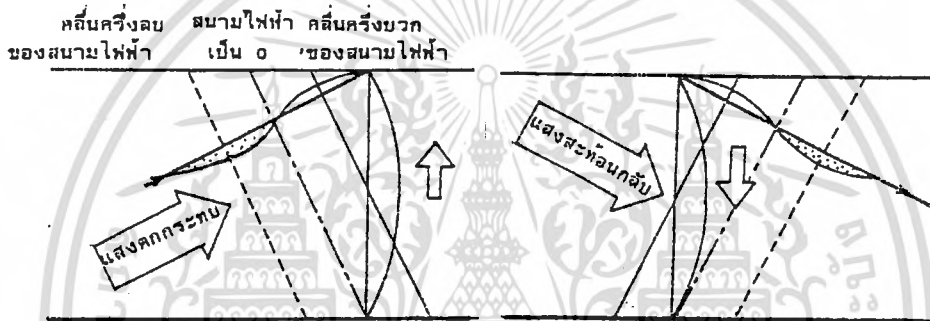
(3.) คลื่นอยู่กับที่ในทิศทางของรัศมี เพื่อให้เงื่อนไขที่รอยต่อของตัวกลางที่กล่าวแล้วใน (2.) เป็นจริงได้นั้นจำเป็นต้องมีคลื่นอยู่กับที่ (ซึ่งเกิดจาก Interference ของแสงตกกระทบกับแสงสะท้อนกลับ) ในทิศทางของรัศมีรูปที่ 2.19 (c) เป็นรูปที่แสดงการเปลี่ยนแปลงทางเฟสของความเข้มของสนามไฟฟ้า ตามการเดินทางของแสงตกกระทบและแสงสะท้อนกลับ ซึ่งมองในทิศทางรัศมีและจะเห็นว่ามีการซ้อนกันของคลื่นที่มีทิศทางสวนกัน



(a) การสะท้อนกลับของแสง

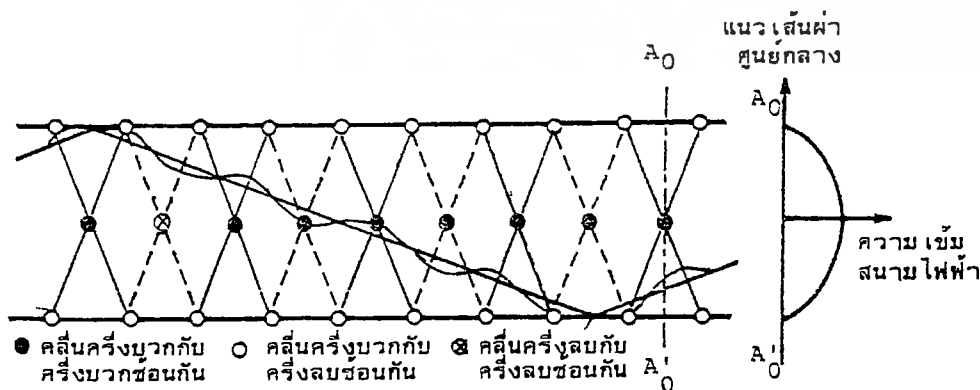


(b) ระนาบที่แสงตกกระทบบกับแสงสะท้อนกลับมีเฟสเหมือนกัน



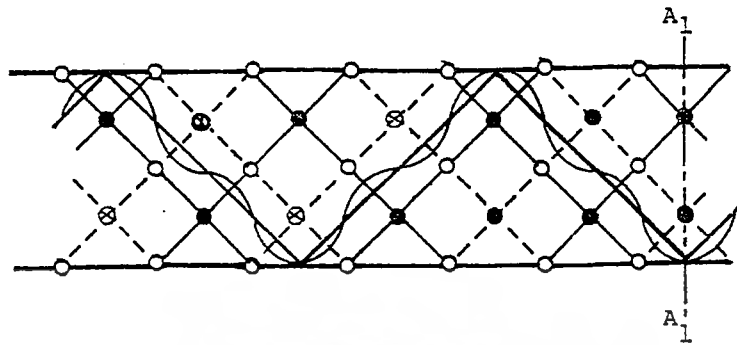
(c) แสงตกกระทบบและแสงสะท้อนกลับเมื่อมองจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปที่ 2.19 แสดงการสะท้อนกลับของแสงที่รอยต่อของตัวกลาง

(4.) โหมดการเดินทางของแสง (Propagation Mode) รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะของความเข้มของสนามไฟฟ้าภายใน Core ของเส้นใยนำแสงที่เกิดขึ้นจากการ Interference ของแสงตกกระทบบและแสงสะท้อนที่มีค่ามุมสะท้อนกลับเป็นพิเศษเฉพาะ



(a) Propagation , Mode 1 -Order

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับองค์กรซึ่งอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) Propagation , Mode 0 -Order

รูปที่ 2.20 แสดง Propagation Mode ภายในเส้นใยนำแสง

จากตัวอย่างทั้งสองของรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าเป็นการแสดง Interference ของแสง ที่มีมุมสะท้อนกลับเป็นพิเศษเฉพาะ ซึ่งทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง 180° , 360° ในทิศทางของรัศมีลักษณะการเดินทางของแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเป็นพิเศษเฉพาะภายใน Core ของเส้นใยนำแสงนี้เรียกว่า Propagation Mode ของแสง จำนวน Propagation Mode ของแสงภายในเส้นใยนำแสงมีค่าจำกัดตามเงื่อนไขของการสะท้อนกลับหมดและนิยามตั้งชื่อ Mode ตามลำดับจาก Propagation Mode ที่มีค่ามุมสะท้อนกลับน้อยไปหามากคือ Mode 0, Mode 1 , Mode 2, Mode (N-1)

2.4.4 ชนิดของเส้นใยนำแสง วิธีการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงมีหลายวิธีกล่าวคือ แบ่งตามชนิดของสาร Dielectric ที่ใช้แบ่งตามจำนวน Propagation Mode, แบ่งตามลักษณะของดัชนีหักเหของ Core ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสง

แบ่งตามชนิดของสาร Dielectric ที่ใช้	Silica Glass Optic Fiber Multi Component Glass Optic Fiber Plastic Optic Fiber
แบ่งตามจำนวน Propagation Mode	Single Mode Optic Fiber Multi Mode Optic Fiber
แบ่งตามลักษณะของ ดัชนีการหักเหของ Core	Step Index Optic Fiber Graded Index Optic Fiber

- 1.) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามชนิดของ Dielectric ที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ
- (1.) Silica Glass Optic Fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็น Silica Glass
 - (2.) Multi Component Glass Optic Fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็นแก้วหลายชนิดปนกัน
 - (3.) Plastic Optic Fiber ซึ่งใช้ Dielectric ที่เป็นพลาสติก
- สำหรับ (1.) นั้นนอกจากจะใช้ Silica (SiO_2) ที่บริสุทธิ์แล้วยังใช้สารอื่นเติมลงไปเพื่อให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงตามต้องการ สารอื่นที่เติมลงไปนี้เรียกว่า Dopant ได้แก่ Germanium (Ge), Boron (B), Fluorine (F) เป็นต้น
- สำหรับ (2.) นั้นส่วนมากจะใช้ Soda Calcium, แก้ว, แก้วที่มี Boron และ Silicon ผสมและอื่น ๆ เป็นสารหลัก ส่วน Dopant ได้แก่ โซเดียม (Na), แคลเซียม (Ca)
- สำหรับ (3.) นั้นใช้สารพวก Silicon Resin, Acryl Resin (เช่น Polymetacryl Methyl Acid : PMMA)
- สำหรับเคเบิลเส้นใยนำแสงที่ใช้ในข่ายการสื่อสารโทรคมนาคม (Telecommunication Network) นั้นนิยมใช้ Silica Glass Optic Fiber เพราะมีข้อดีคือ การสูญเสีย (Loss) ต่ำและคุณสมบัติการส่ง (Transmission Characteristic) คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สำหรับงานที่ต้องการคุณสมบัติการส่งค้อยลงมา, ใช้งานง่าย (ต่อง่าย, หักยากแม้จะงอเส้นใยแสงมาก ๆ เป็นต้น) และใช้กับการสื่อสารระยะทางไกลใช้กับการเดินสายภายในรถยนต์ (Wire Harness) และอื่น ๆ ในกรณีนี้นิยมใช้ เส้นใยนำแสงที่เป็น Plastic Optic Fiber

2.) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามจำนวน Propagation Mode สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ Single Mode Optic Fiber ใช้ชื่อย่อว่า SM Fiber และอีกชนิดหนึ่งคือ Multi Mode Optic Fiber

3.) การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงตามลักษณะของดัชนีหักเห สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเห คือ

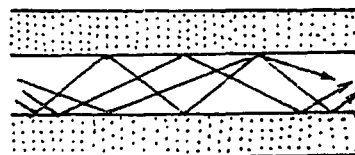
(1.) Step Index Optic Fiber (SI-Fiber) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหระหว่าง Core กับ Cladding เป็นลักษณะขั้นบันได (Step) จึงเรียกว่า Step Index Optic Fiber

(2.) Graded Index Optic Fiber (GI Fiber) เป็นเส้นใยแสงที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหระหว่าง Core กับ Cladding ค่อย ๆ ลดลงทีละน้อยต่างกับ (1.) จึงเรียกว่า Graded Index Optic Fiber

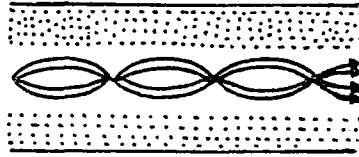
SM Fiber นั้นจัดอยู่ในพวกของ SI Fiber เหมือนกัน แต่ทว่าเนื่องจากจุดประสงค์ต้องการให้เป็น Single Mode จึงทำให้อัตราส่วนผลต่างของค่าดัชนีหักเหของ Core และ Cladding มีค่าน้อยมาก จึงแบ่งชนิดแยกออกมาต่างหาก ดังนั้นในกรณีที่เรียกว่า SI Fiber นั้น โดยทั่วไปจะหมายถึง Multi Mode Optic Fiber ที่มีผลต่างของดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นบันได (Step)

ลักษณะการเดินทางของแสงภายใน Core ของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 2.21

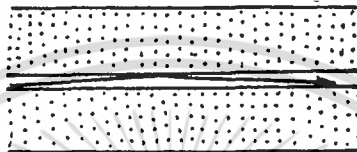
GI Fiber เป็นเส้นใยนำแสงที่จัดทำเป็นพิเศษเพื่อการส่ง Multi Mode รูปที่ 2.22 แสดงถึง Propagation Mode ของ GI Fiber



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ a) เส้นใยแสงแบบ SI - Type (Multimode) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

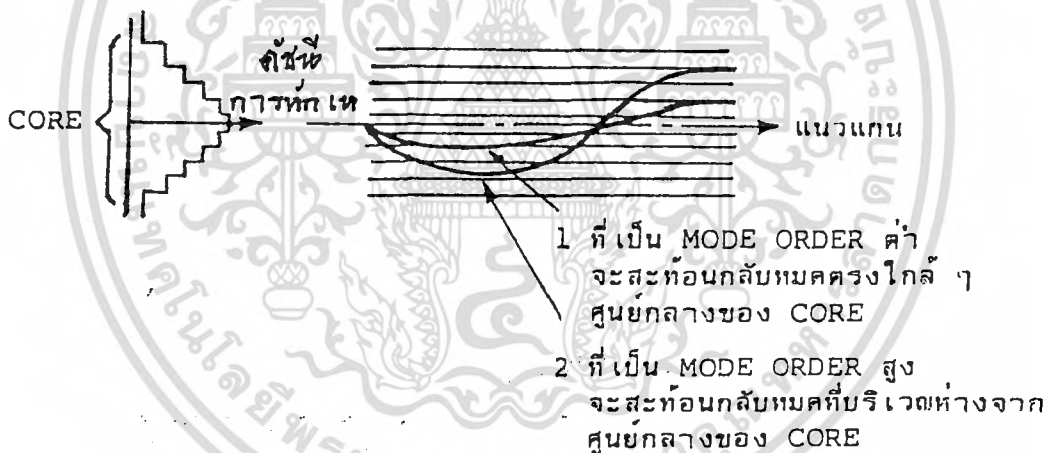


(b) เส้นใยนำแสงแบบ GI - Type



(c) เส้นใยนำแสงแบบ SM - Type

รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน Core ของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงใน GI Fiber

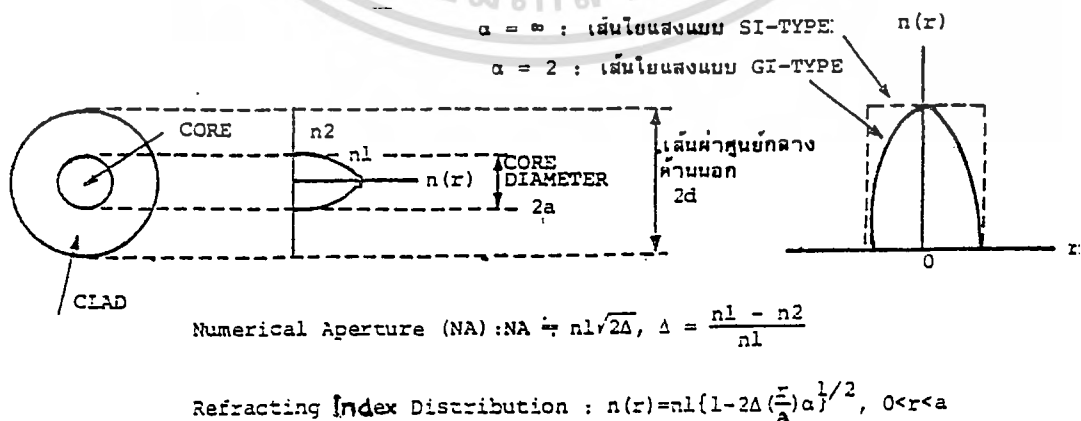
จากรูปที่ 2.22 จะเห็นว่า ค่าดัชนีหักเหของ GI Fiber นี้จะค่อย ๆ ลดลงทีละน้อยในแนวรัศมีของเส้นใยนำแสง ดังนั้นลำแสง (1.) ที่มี Mode ต่ำและเดินทางในระยะทางสั้นนั้น จะสะท้อนกลับก่อนที่จะเดินทางไปถึงรอยต่อของ Core และ Cladding ซึ่งกล่าวได้ว่า ส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีดัชนีการหักเหสูงของ Core ส่วนลำแสงที่มี Mode สูงและเดินทางในระยะทางไกลนั้น ส่วนใหญ่จะผ่านส่วนที่มีดัชนีหักเหต่ำของ Core อนึ่งความเร็วในการเดินทางของแสงนั้น จะเป็นสัดส่วนกลับกับค่าดัชนีหักเห ดังนั้น สำหรับ Propagation Mode (1.) และ (2.) นั้นโดยการเลือกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเห เรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ เพื่อใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Profile และ (2.) มีค่าเท่ากันได้ ด้วยจุดประสงค์อันนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้ผลต่างของเวลาการเดินทางระหว่าง Propagation Mode ต่าง ๆ มีค่าน้อยที่สุดได้นั้น กล่าวกันว่าจะต้องมีรูปร่างเป็นลักษณะพาราโบลา (Parabola) ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของ GI Fiber จึงต้องทำให้มีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.22

2.4.5 โครงสร้างของเส้นใยแสง องค์ประกอบพื้นฐานที่กำหนดโครงสร้างของเส้นใยนำแสงคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Core, เส้นผ่านศูนย์กลางนอก (เส้นผ่านศูนย์กลางของ Cladding), Numerical Aperture (NA) และอื่น ๆ องค์ประกอบเหล่านี้เรียกว่าเป็น Parameter ทางโครงสร้างของเส้นใยนำแสง Parameter ทางโครงสร้างเหล่านี้นอกจากมีผลต่อการสูญเสีย (Loss), Transmission Band Width, ความแข็งแรงทางเชิงกลและคุณสมบัติอื่น ๆ ของเส้นใยนำแสงแล้วยังเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสง หรือ การต่อของเส้นใยนำแสงกับอุปกรณ์แสง (Optic Device) อีกด้วย นอกจากนี้ยังมี Parameter ประกอบทางโครงสร้างเพิ่มเติมอีก ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การคลาดเคลื่อนของศูนย์กลาง (Eccentricity), อัตราความเพี้ยนของวงกลม (Non-Circular Rate) สำหรับ Parameter ประกอบนี้จะไม่มีผลอะไรทางด้านคุณสมบัติการส่ง (Transmission Characteristic) แต่ทว่า มันจะมีผลอย่างมากต่อการสูญเสียของการต่อ (Connection Loss) ของเส้นใยนำแสง

ตัวอย่างเช่น ในการกำหนดโครงสร้างของเส้นใยนำแสงชนิด Multimode Optic Fiber จะต้องอาศัย Parameter 4 อัน คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core, เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก, Numerical Aperture (NA) และลักษณะของค่าดัชนีหักเห ดังแสดงในรูปที่ 2.23

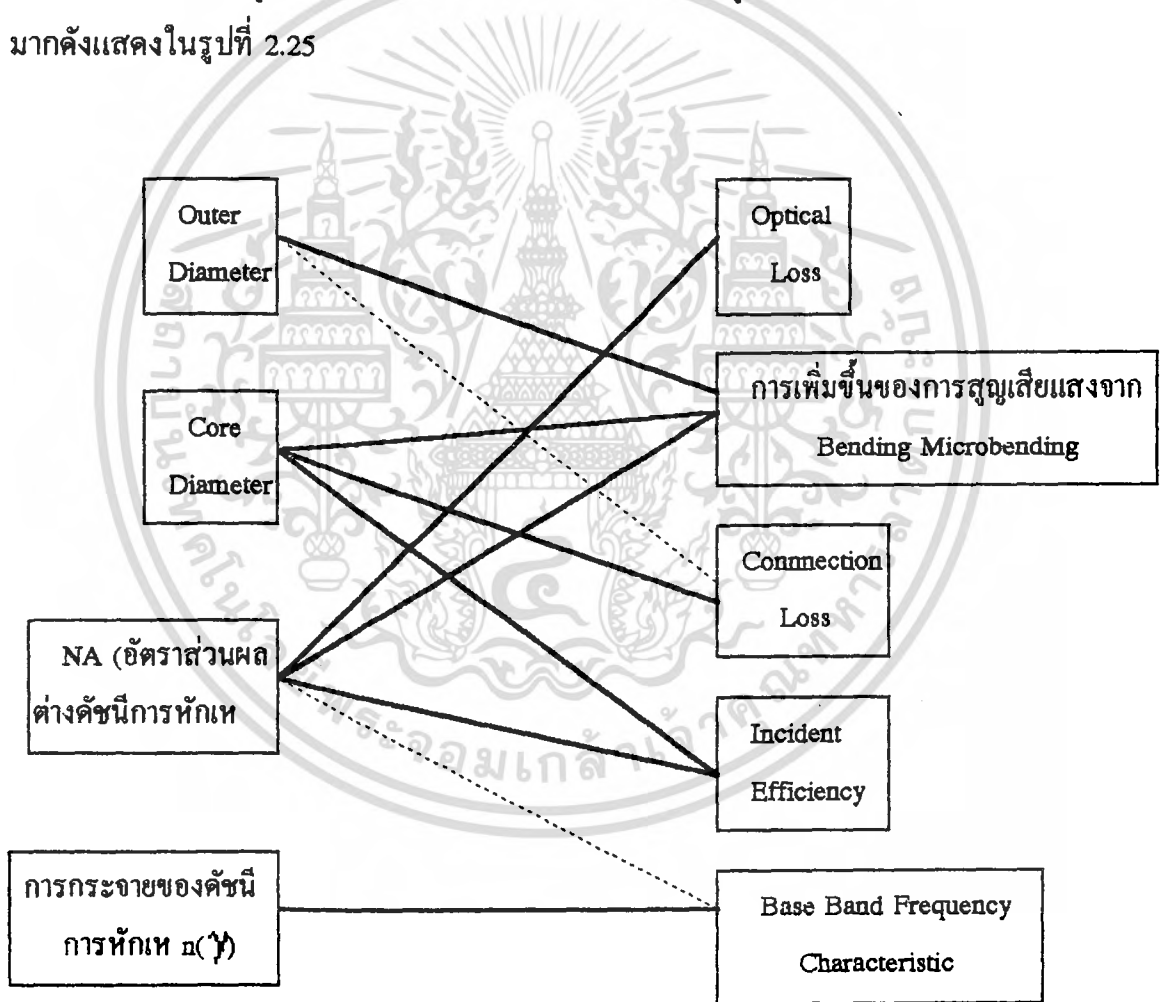


รูปที่ 2.23 แสดง Parameter ทางโครงสร้างของ Multi Mode Optic Fiber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

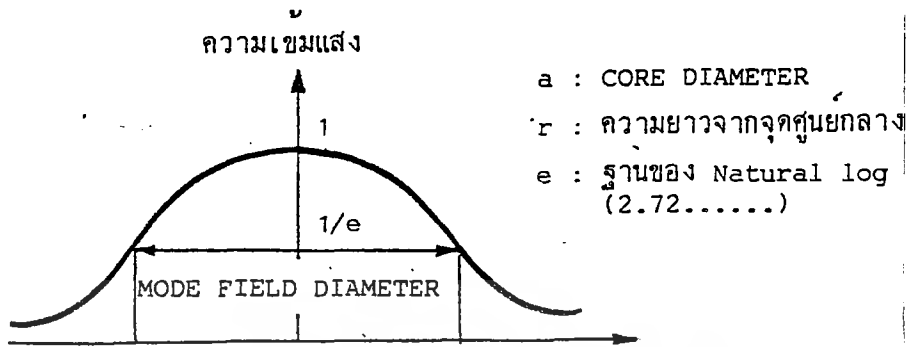
ในการกำหนดค่าต่าง ๆ ของ Parameter ทางโครงสร้างทั้ง 4 เหล่านี้จำเป็นต้องคำนึงถึงผล Parameter ทางโครงสร้างแต่ละอันที่มีต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยนำแสง, การสร้างได้ง่ายและความประหยัด ดังแสดงในแผนผังของรูปที่ 2.23

สำหรับโครงสร้างของ Single Mode Optic Fiber จะกำหนดจาก Parameter 3 อัน คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field, เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก และ Cut Off Wave Length ซึ่งต่างกับกรณีของ Multi Mode Optic Fiber ที่กล่าวมาแล้ว สาเหตุที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field เป็น Parameter ทางโครงสร้างของ Single Mode Optic Fiber แทนการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core นั้นก็คือว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field มีค่ามากดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 แสดงแผนผังคุณสมบัติต่าง ๆ ของ Parameter ทางโครงสร้างของเส้นใยนำแสง

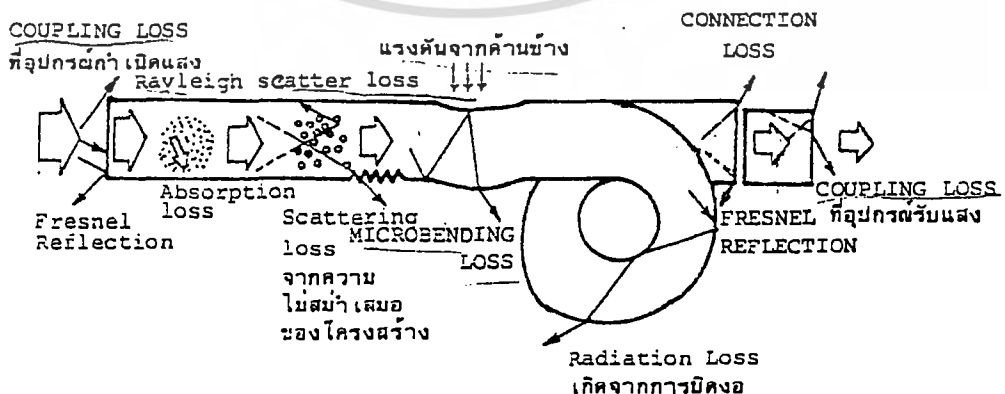
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mode Field

2.4.6 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยนำแสง ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง มีองค์ประกอบสำคัญ 2 อันที่จะกำหนดความเร็วในการส่ง (Transmission Speed) และระยะห่างของการถ่ายทอคสัญญาณ (Repeater Span) องค์ประกอบเหล่านั้น คือ การสูญเสียแสง กับ Band Width ของการส่ง (Transmission Band Width) การสูญเสียแสง (Optical Loss) เป็นตัวบอกให้ทราบว่า กำลังของแสงที่เดินทางไปในเส้นใยนำแสงนั้นจะลดลงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งการสูญเสียแสงนี้ยังมีค่าน้อยเท่าไรจะทำให้สามารถส่งสัญญาณแสงได้ไกลมากยิ่งขึ้น

การสูญเสียแสง แบ่งออกตามความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้น ได้เป็นการสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยนำแสง (Fixed Loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมา (Addition Loss) เมื่อตอนนำเส้นใยนำแสง ไปใช้ในระบบการสื่อสาร สาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสงแสดงดังรูปที่ 2.26



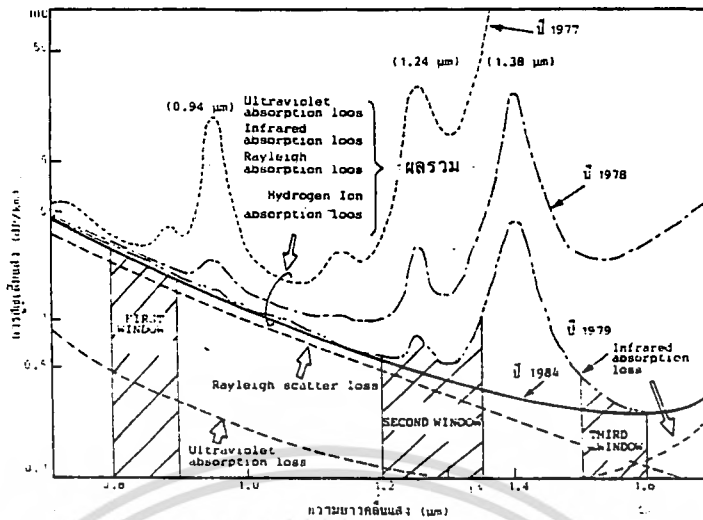
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.26 แสดงสาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.26 จะเห็นว่าการสูญเสียที่มีอยู่ในตัวของเส้นใยนำแสงเองนั้น เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ การดูดแสง (Absorption Loss), การกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เล่ (Rayleigh Scattering Loss) การกระจัดกระจายแสงเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้าง (Ununiformity Loss) ส่วนการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นมานั้นเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ การโค้งงอของเส้นใยนำแสง (Bending Loss), การโค้งงอแบบ Microbending (Microbending Loss) การต่อเส้นใยนำแสง (Connection Loss ได้แก่ การสูญเสียจากการสะท้อนกลับของแสง, จากการที่กระจายของแสง), การเชื่อมต่อแสงระหว่างอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสงหรืออุปกรณ์รับแสงกับเส้นใยนำแสง (Coupling Loss)

1.) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสง (Absorption Loss) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการดูดแสงนี้เป็นลักษณะทำนองเดียวกันกับมันส์ค่าที่ดูดแสงได้คือ สารที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสงเองนั้นจะเป็นตัวดูดแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสง แล้วเปลี่ยนเป็นการสูญเสียทางความร้อน โดยทั่วไปแล้วจะมีการดูดแสงอันเนื่องมาจากแก้วเอง (สารที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสง) และเนื่องมาจากสารอื่นที่เจือปนอยู่ในแก้ว (Impurity)

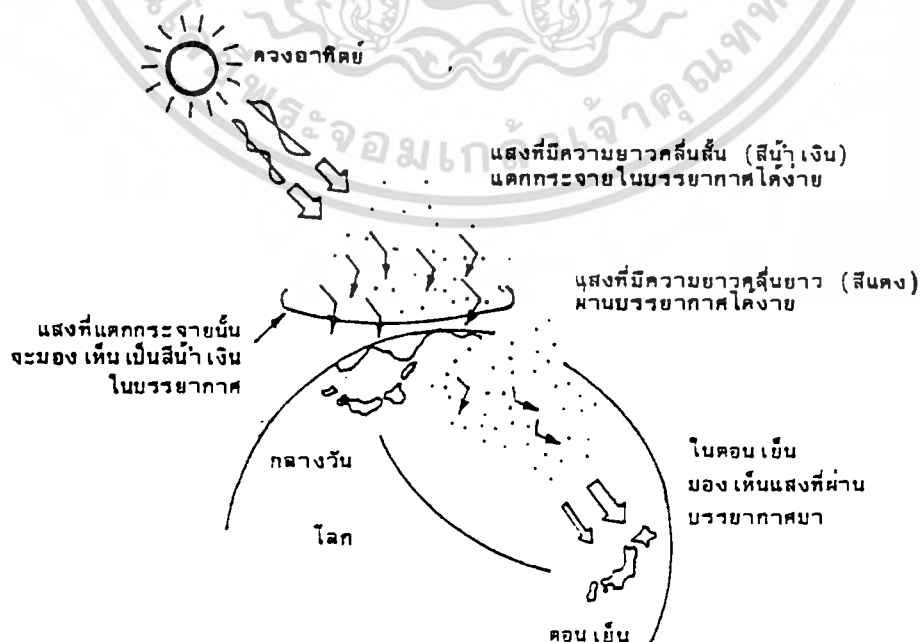
สำหรับการสูญเสียจากการดูดแสงของแก้วนั้น มันจะดูดแสง Ultraviolet กับแสง Infrared การดูดแสง Ultraviolet นั้น จะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ $0.1 \mu\text{m}$ และการดูดแสง Infrared จะดูดมากที่สุดที่ความยาวคลื่นใกล้กับ $10 \mu\text{m}$ ส่วนที่ความยาวคลื่นอื่น ๆ นั้นการสูญเสียจากการดูดแสงจะลดลงอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.27 จะเห็นว่าจากความยาวคลื่นประมาณ $1.0 \mu\text{m}$ ไปจนถึงประมาณ $1.6 \mu\text{m}$ การสูญเสียจะตกลงเป็นเสมือน (Valley)

การสูญเสียจากการดูดแสงอันเนื่องมาจากสารแปลกปลอม (Impurity) ปนอยู่นั้น ในตอนแรกที่พัฒนาเส้นใยนำแสงใหม่ ๆ นั้นปรากฏว่าส่วนใหญ่เป็น Ion ของโลหะต่าง ๆ เช่น Ion ของเหล็ก, Ion ของทองแดงและอื่น ๆ แต่ต่อมาเทคนิคในการทำให้การสูญเสียแสงต่ำลง ได้พัฒนาไปมากสามารถกำจัด Ion ของโลหะต่าง ๆ ออกไปได้ ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็น Hydroxyl Ion (OH) นั่นคือกล่าวได้ว่าประวัติศาสตร์ของการทำให้การสูญเสียของแสงที่มีอยู่ในเส้นใยนำแสงให้มีค่าน้อยนั้นเป็นการกำจัด Absorption Loss อันเนื่องมาจาก Ion ของโลหะและ Hydroxyl Ion เหล่านี้นั่นเองในรูปที่ 2.27 จะเห็นว่าแสดงการสูญเสียแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ของแสงในเส้นใยนำแสงที่ทำด้วยแก้ว



รูปที่ 2.27 แสดงคุณสมบัติการสูญเสียแสงจากการดูดแสงของเส้นใยนำแสงที่ทำด้วยแก้ว

2.) การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เล่(Rayleigh Scattering Loss) การสูญเสียแบบนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น เมื่อแสงไปกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น แล้วทำให้แสงนั้นแตกกระจัดกระจายออกไปในทิศทางต่าง ๆ ตัวอย่างของปรากฏการณ์เช่นนี้แสดงดังรูปที่ 2.28 คือการที่เรามองเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงิน และมองเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงตอนตะวันตกดินนั้น เกิดจากการแตกกระจัดกระจายของแสง ผู้ที่ทำการอธิบายปรากฏการณ์การแตกกระจัดกระจายของแสงนี้ คือนักฟิสิกส์ชื่อ Rayleigh ดังนั้นจึงใช้ชื่อของเขาเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Rayleigh Scattering



รูปที่ 2.28 แสดง Scattering ของแสงในบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

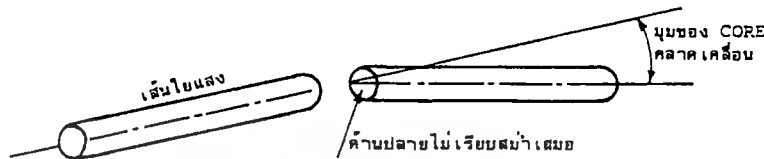
3.) การสูญเสียจากการกระจัดกระจายแสง อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของ โครงสร้างในเส้นใยนำแสง (Uniformity Loss) สำหรับเส้นใยนำแสงที่สร้างขึ้นมาจริง ๆ นั้น จากสาเหตุต่าง ๆ ในการสร้างทำให้ไม่สามารถได้เส้นใยนำแสงที่มีลักษณะกลม 100 % นอกจากนั้น Core และ Cladding ที่ประกอบกันเป็นเส้นใยนำแสงก็ไม่สามารถทำให้ได้ ลักษณะรูปทรงกระบอกที่สม่ำเสมออย่างสมบูรณ์ ตลอดความยาวของเส้นใยนำแสงได้ กล่าวคือตรงรอยต่อของ Core กับ Cladding นั้นจะไม่สม่ำเสมอตลอด จะมีลักษณะคล้าย ถนนขรุขระ เมื่อมีรอยต่อไม่เรียบสม่ำเสมอเช่นนี้ จะทำให้เกิดการกระจัดกระจายของแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ทำให้แสงบางส่วนไม่สามารถเดินทางไปใน Core ได้ จะกระจาย ออกไปข้างนอก ดังนั้นรอยต่อที่ไม่เรียบสม่ำเสมอ จะทำให้แสงที่เดินทางเกิดการสะท้อน กลับอย่างอิสระทำให้การสูญเสียแสงเพิ่มขึ้น การสูญเสียแสงเช่นนี้เรียกว่าการสูญเสียจาก การกระจัดกระจายแสงอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างในเส้นใยนำแสง

4.) การสูญเสียจากการกระจายแสงอันเนื่องมาจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสง (Bending Loss) เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยนำแสงถูกทำให้โค้งงอไป สำหรับการ โค้งงอเส้นใยนำแสงดังแสดงในรูปที่ 2.26 แสงที่มีมุมโค้งงอมากกว่ามุมวิกฤติแล้ว แสงนั้น จะกระจายออกไปนอก Core ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น ดังนั้นในการออกแบบระบบการ สื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง จะต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดมีการงอเส้นใยนำแสงมีรัศมีเกินกว่า รัศมีที่ยอมให้โค้งงอได้

5.) การสูญเสียที่เกิดจากการงอโค้งแบบ Micro Bending เป็นการสูญเสียที่เกิด จากการที่มีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยนำแสง ทำให้แกนของเส้น ใยนำแสงบิดงอไปเล็กน้อย เป็นเหตุให้การสูญเสียเพิ่มขึ้น การสูญเสียนี้ เรียกว่า Micro Bending Loss ด้วยเหตุนี้ในการออกแบบโครงสร้างเส้นใยนำแสงจะต้องทำการ ป้องกัน แรงกดจากทางด้านข้าง เช่น ทำชั้น (Layer) ป้องกันการกระแทกเส้นใยนำแสงเป็นต้น

6.) การสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง (Connection Loss) การต่อเส้นใยนำ แสงนั้นต้องต่อเข้ากันอย่างดี อันดับแรกจำเป็นต้องทำการปรับ Core ทั้งสองที่แสงเดินทาง ผ่านให้ตรงกันพอดี ถ้าหากว่า Core ทั้งสองต่อกันไม่สนิทอย่างสมบูรณ์นั้น แสงที่ออกจาก Core ด้านหนึ่งบางส่วนของมันจะไม่เข้าไปใน Core อีกด้านหนึ่งแต่จะกระจายออกไปข้าง นอกทำให้เกิดการสูญเสีย สาเหตุการเกิดการสูญเสียอย่างนี้แสดงในรูปที่ 2.29 กล่าวคือมีทั้ง การคลาดเคลื่อนของแกนของ Core และอื่น ๆ แต่สำหรับค่าการสูญเสียนั้นส่วนใหญ่จะมา จากการคลาดเคลื่อนของแกนของ Core หนึ่งตรงส่วนที่ทำการต่อกัน กรณีที่มีช่องว่าง (Gap)

มีเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ ถ้าหากช่องว่างโตมากขึ้นกว่านี้ จะเกิดการสะท้อนกลับที่เรียกว่า Fresnel Reflection



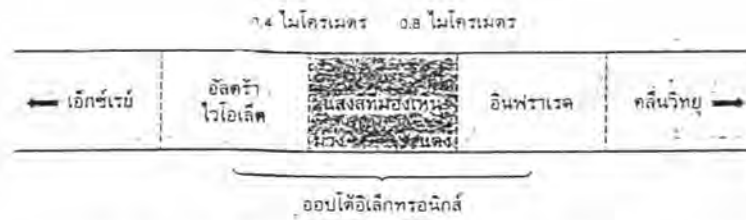
รูปที่ 2.29 แสดงสาเหตุของการสูญเสียที่เกิดจากการต่อเส้นใยนำแสง

7.) การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงกับอุปกรณ์กำเนิดแสง และอุปกรณ์รับแสง (Coupling Loss) แสงที่ปล่อยออกจากอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นมีเงื่อนไขในการที่จะป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง คือค่า NA (Numerical Aperture) กรณีที่ใช้อุปกรณ์กำเนิดแสงได้แก่ Laser Diode (LD) หรือ Light Emitting Diode (LED) จะมีความแตกต่างกันทางความกว้างของลำแสงที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง นอกจากนั้นโครงสร้างของเส้นใยนำแสงที่จะถูกป้อนแสงเข้าไบนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ของเส้นใยนำแสงแบบ SM และแบบ GI จะมีค่าต่างกันทำให้ขนาดของการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงมีค่าต่างกันไปด้วย

เกี่ยวกับการสูญเสียของการเชื่อมต่อแสงระหว่างเส้นใยนำแสงกับอุปกรณ์รับแสงนั้น เส้นใยนำแสงที่มี NA มากนั้นคือแสงที่ออกจากเส้นใยนำแสงแบบ GI จะมีลำแสงกว้างกว่าลำแสงที่ออกจากเส้นใยนำแสงแบบ SM ทำให้การสูญเสียแสงมีมากกว่า

2.4.7 ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหนึ่ง มีความเร็ว 3×10^8 เมตรต่อวินาที แสงที่มองเห็นได้ (Visible light) เป็นสเปกตรัมหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.4 ไมโครเมตร (แสงสีม่วง) ไปจนถึง 0.8 ไมโครเมตร (แสงสีแดง) ทว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับแสงหรือเรียกว่า ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics) นั้น จะมีย่านการใช้งานมากกว่าย่านแสงที่มองเห็น เพราะมันสามารถทำงานได้ในย่านเหนือแสงสีม่วงหรืออัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และใต้แสงสีแดงหรืออินฟราเรด (Infrared) ในรูปที่ 2.30 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสเปกตรัมย่านการใช้งานของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



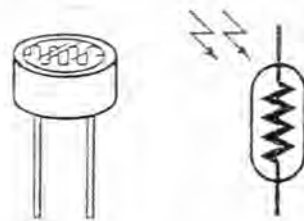
รูปที่ 2.30 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็ก และแสดงย่านการใช้งานของออปโตอิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่จะกล่าวถึงในบทนี้แบ่งออกเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงหรือเซนเซอร์ (Sensor) และอุปกรณ์กำเนิดแสงหรืออิมิตเตอร์ (Emitter)

1.) อุปกรณ์ตรวจจับแสง สามารถแบ่งพิจารณาได้ดังนี้

(1.) ตัวต้านทานแปรค่าตามแสง (Light Dependent Resistor : LDR)

เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของตัวเองไปตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ มีลักษณะรูปร่างภายนอกและสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.31 ตามปกติแล้ว LDR เมื่ออยู่ในที่มืดจะมีค่าความต้านทานสูงมากประมาณ 2 เมกะโอห์ม และถ้ามีแสงมาตกกระทบ ความต้านทานจะลดลงเหลือต่ำสุดประมาณ 100 โอห์ม โดยทั่วไป LDR จะตอบสนองได้ดีที่สุดกับแสงที่มีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (0.6 ไมโครเมตร) ซึ่งก็จะอยู่ที่ขอบของสเปกตรัมแสงสีแดง ความเร็วในการทำงานอุปกรณ์ลักษณะนี้ค่อนข้างต่ำ คือ กว่าจะตอบสนองการทำงานจะใช้เวลาเป็นมิลลิวินาที และการตอบสนองมักจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นเชิงเส้น และยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิรอบ ๆ ตัวอุปกรณ์ด้วย ดังนั้นจึงควรใช้ LDR นี้ในการเปิด-ปิดการทำงานด้วยแสงจะเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 2.31 แสดงรูปร่างและสัญลักษณ์ของ LDR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.) โฟโตรีซิสติวิตีหรือเซลล์แสงอาทิตย์

เป็นอุปกรณ์ที่เมื่อมีแสงมาตกกระทบตัวมัน จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น แต่จะมีกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ในเซลล์หนึ่ง ๆ จะให้แรงดันได้ประมาณ 0.4 โวลต์ กระแสระหว่าง 20-100 มิลลิแอมป์ที่แสงอาทิตย์ตอนกลางวัน

ความสัมพันธ์ของแรงดันกับความเข้มของแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะลอการิทึม ในขณะที่ของกระแสจะเป็นเชิงเส้น ราคาของโฟโตรีซิสติวิตีหรือเซลล์แสงอาทิตย์นี้ค่อนข้างสูง จึงเหมาะกับการที่มีลักษณะพิเศษกล่าวคือ เป็นวงจรที่ไม่ต้องการใช้แบตเตอรี่หรือไฟบ้านเป็นแหล่งจ่ายไฟ

(3.) โฟโตรีโอดี

เป็นโอดีที่จะทำงานเมื่อมีแสงมาตกกระทบ สัญลักษณ์ของโฟโตรีโอดีแสดงดังรูปที่ 2.32 ในสถานะที่การนำโฟโตรีโอดีไปต่อใช้งานต้องต่อในลักษณะไบแอสกลับ คือ ต่ออาโนดเข้ากับไฟลบ, คาโทดเข้ากับไฟบวก จนเมื่อมีแสงมาตกกระทบจึงจะสามารถนำกระแสได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในขณะที่ไม่มีแสงมาตกกระทบก็จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ค่าหนึ่งประมาณ 10 ไมโครแอมป์ เมื่อมีแสงมาตกกระทบกระแสจะไหลเพิ่มเป็นประมาณ 100 ไมโครแอมป์

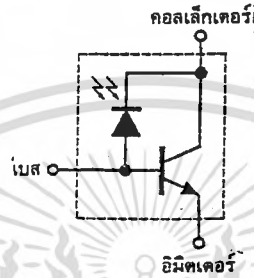


รูปที่ 2.32 แสดงสัญลักษณ์ของโฟโตรีโอดี

โฟโตรีโอดีเป็นอุปกรณ์ที่มีกำลังไฟฟ้าค่า อิมพีแดนซ์สูง และเมื่อนำมาใช้จำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรที่ซับซ้อนกว่า LDR แต่ว่าการตอบสนองในการทำงานของโฟโตรีโอดีเพียง 200 นาโนวินาทีเท่านั้น มักนำโฟโตรีโอดีไปใช้ในตัวอ่านแถบความถี่สูง และในออปโตไอโซเลเตอร์

(4.) โฟโตทรานซิสเตอร์

เป็นทรานซิสเตอร์ที่รวมเอาโฟโตไดโอดเข้ามาไว้ภายในตัวถึงเพียงกันคั้งแสดง
 ในรูปที่ 2.33 โดยโฟโตไดโอดทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวไบแอส ให้แก่ขาเบสของ
 ทรานซิสเตอร์ เมื่อมีแสงมาตกกระทบโฟโตไดโอดจะนำกระแส ทำให้มีกระแสไหลที่ขาเบส
 ทรานซิสเตอร์จึงสามารถนำกระแสได้



รูปที่ 2.33 แสดงวงจรพื้นฐานของโฟโตทรานซิสเตอร์

ในเรื่องของกระแสรั่วไหล โฟโตทรานซิสเตอร์จะมีมากกว่าโฟโตไดโอด
 เล็กน้อยแต่ถ้าเป็นช่วงนำกระแสแล้วจะเกิดกระแสไหลสูงกว่ามากเป็นหน่วยมิลลิแอมป์ แต่
 อย่างไรก็ตามความเร็วในการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์แม้จะเร็วกว่า LDR แต่ก็ช้า
 กว่าโฟโตไดโอด ทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้ที่ความถี่ไม่เกิน 100
 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่มีข้อดีในแง่ของกระแสเอาท์พุทที่สูงกว่า

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของตัวตรวจจับแสงแบบต่าง ๆ

ชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับแสง	ข้อดี	ข้อเสีย
ตัวต้านทานแปรค่าตามแสง (LDR)	1.ราคาถูก 2.เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในขณะที่ทำงาน 3.ต่อวงจรใช้งานง่าย	1.ไวต่ออุณหภูมิ 2.ทำงานช้ามาก 3.ทำงานไม่เป็นเชิงเส้น
โฟโตโวลตาอิกหรือ เซลล์แสงอาทิตย์	1.ทำงานเป็นเชิงเส้นและลอกาทิม 2.สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีแหล่งจ่ายไฟ	1.ราคาแพง 2.ทำงานช้า
โฟโตไดโอด	1.ทำงานเป็นเชิงเส้น 2.ทำงานเร็วมาก 3.ขนาดเล็ก 4.สามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้าง	1.เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่ค่อยชัดเจนขณะทำงาน 2.ให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตต่ำ
โฟโตทรานซิสเตอร์	1.สามารถเชื่อมต่อกับโหลดขนาดเล็กได้โดย	1.ทำงานไม่เป็นเชิงเส้น 2.ไวต่ออุณหภูมิ

2.) อุปกรณ์กำเนิดแสง สามารถพิจารณาได้ดังนี้

(1.) LED (Light Emitting Diode)

LED เป็นไดโอดที่สามารถเปล่งแสงได้ในขณะที่มันนำกระแส มีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.34 เนื่องจากเป็นไดโอดแบบหนึ่ง ดังนั้นการทำให้มันนำกระแสได้ ก็ต้องให้ไบแอสเช่นเดียวกับไดโอด คือ ต่อไฟบวกเข้าที่แอนโอด ไฟลบเข้าที่คาโทด แต่จะต้องต่อตัวต้านทานอนุกรมกับ LED ด้วย เพื่อจำกัดกระแสไม่ให้ไหลผ่าน LED มากเกินไป ดังรูปที่ 2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LED จะสามารถนำกระแสได้เมื่อมีแรงดันตกคร่อมตัวมันตั้งแต่ 2-5 โวลต์ กระแสที่ไหลผ่านจะอยู่ระหว่าง 5-30 มิลลิแอมป์ ไม่ควรเกินกว่านี้ เพราะอาจทำให้ LED เสียหายได้

การเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมให้แก่ LED เป็นไปตามสูตรได้ดังนี้

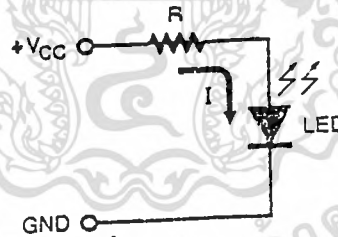
$$R = \frac{V - V_f}{I} \quad \text{โอห์ม}$$

โดยที่ V คือ แรงดันไฟเลี้ยง มีหน่วยเป็น โวลต์

V_f คือ ค่าแรงดันไบแอสตรงที่ตกคร่อม LED แล้วทำให้มันทำงานมีหน่วยเป็น โวลต์

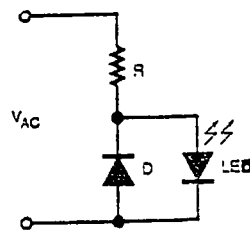
I คือ ปริมาณกระแสไฟตรงที่ต้องการให้ไหลผ่าน LED มีหน่วยเป็น แอมแปร์

รูปที่ 2.34 แสดงสัญลักษณ์ของ LED



รูปที่ 2.35 แสดงวงจรใช้งาน LED

LED เหมาะที่จะใช้กับวงจรไฟตรง แต่ถ้าหากต้องการนำไปใช้ในวงจรไฟสลับก็สามารถทำได้โดยจัดวงจรป้องกัน LED ไม่ให้เสียหาย เมื่อ LED ได้รับแรงดันไบแอสกลับ ด้วยการต่อไดโอดกลับขั้วขนานกับ LED ดังรูปที่ 2.36



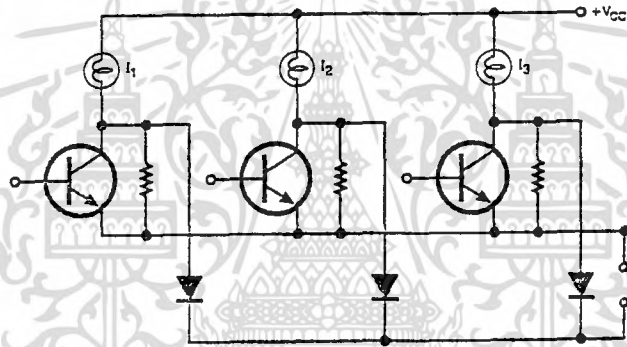
รูปที่ 2.35 เมื่อใช้ LED กับแรงดันไฟสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LED มีให้เลือกใช้งานหลายแสงสีที่มีในปัจจุบัน ได้แก่ สีแดง, เหลือง, เขียว, ส้ม และอินฟราเรด นอกจากนั้น LED ยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับแสง เช่น โฟโตเซลล์ได้อีกด้วย

(2.) หลอดไฟไส้ (Incandescent Bulbs)

เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงอีกแบบหนึ่งที่ให้แสงสว่างมากกว่า LED มาก อายุการใช้งานของหลอดไฟนี้อยู่ประมาณ 1,000 ชั่วโมง หลอดไฟไส้จะสว่างได้เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าผ่านไส้หลอดจนเกิดความร้อนจึงเปล่งแสงออกมา โดยมีหลอดแก้วที่ห่อหุ้มไส้หลอดทำหน้าที่กระจายแสงในการนำมาใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.37 โดยมีทรานซิสเตอร์เป็นตัวควบคุมการติด-ดับของหลอดแทนสวิตช์



รูปที่ 2.37 แสดงวงจรควบคุมหลอดไฟไส้โดยใช้ทรานซิสเตอร์

(3.) หลอดนีออน (Neon)

มีลักษณะเป็นหลอดก๊าซ ใช้กับงานที่มีแรงดันสูง ๆ โดยมักใช้เป็นตัวแสดงการทำงานของเครื่องจักร เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยกระแสเช่นเดียวกับ LED จึงต้องมีการต่อตัวต้านทานอนุกรมกับหลอดเพื่อจำกัดกระแสด้วย สูตรการคำนวณหาตัวต้านทานสามารถใช้สูตรเดียวกับ LED ได้ แต่เปลี่ยนค่า V_f เป็นประมาณ 100 โวลต์

(4.) LCD (Liquid Crystal Display)

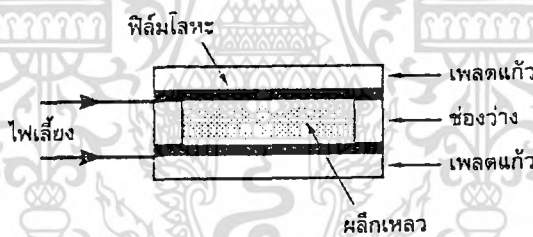
เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำไปใช้เป็นตัวแสดงผลข้อความหรือตัวเลขมากกว่านำมาใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงสว่าง เนื่องจากมันมีความเข้มต่ำมาก และกินกำลังไฟฟ้าต่ำมากด้วยเช่นกัน จึงนิยมนำ LCD มาใช้ในเครื่องคิดเลขและนาฬิกาดิจิตอล

ลักษณะโครงสร้างของ LCD แสดงดังรูปที่ 2.38 จะประกอบด้วย
 เพลตแก้ว 2 แผ่น ที่วางขนานกันถูกคั่นกลางด้วยช่องว่างอากาศ ซึ่งบรรจุผลึกเหลวเอาไว้
 เมื่อจ่ายแรงดันเข้าเพลต ผลึกเหลวก็จะมีการจัดเรียง โมเลกุลแสดงผลออกมา

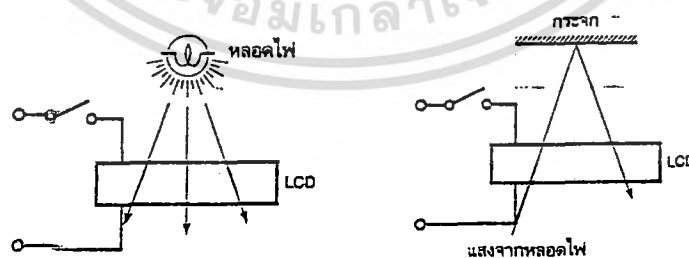
การแสดงผลของ LCD มีด้วยกัน 2 โหมดคือทรานสมิซิฟ (Transmissive) และรีเฟล็กทีฟ (Reflective) การทำงานในโหมดทรานสมิซิฟ แสดงดังรูปที่ 2.39 โดยจะ
 ต้องใช้แสงจากหลอดไฟส่องผ่านมาทางด้านหลัง จึงจะสามารถมองเห็นข้อมูลบนจอ LCD
 ส่วนแบบโหมดรีเฟล็กทีฟจะใช้การสะท้อนแสงจากภายนอกมากระทบกระจกที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังจอ LCD เพื่อให้เกิดแสงส่องทางด้านหลังของจอ จึงมองเห็นข้อมูลบนจอ LCD

ปกติแล้ว LCD จะกินกระแสไฟฟ้าต่ำมาก ประมาณ 1 ไมโครแอมป์เท่านั้น
 จึงสามารถใส่แบตเตอรี่ธรรมดาเป็นแหล่งจ่ายไฟได้

การขับ LCD ให้แสดงผลนั้น มักใช้ไอซีซีโมสเป็นตัวขับ ถึงแม้ว่าตัว LCD
 จะใช้ไฟตรงเป็นไฟเลี้ยงก็ตาม แต่การขับ LCD จะใช้สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมมากระตุ้นที่แผ่น
 ตัวนำใสและที่แผ่นพื้น (Backplane) ของ LCD



รูปที่ 2.38 แสดงโครงสร้างของ LCD



รูปที่ 2.39 การแสดงผลของ LCD (a) แบบทรานสมิซิฟ (b) แบบรีเฟล็กทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5.) เลเซอร์ (LASER)

มาจากคำว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation อันเป็นชื่อของกระบวนการกำเนิดแสงเลเซอร์ ก่อนจะเข้าไปสู่การทำงานของเลเซอร์ จะต้องมีความเข้าใจในเรื่องของระดับพลังงานเสียก่อน

ในรูปที่ 2.40 แสดงระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะเห็นว่าที่ระดับพลังงานต่ำกว่า 10 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV : Electron Volts) จะเป็นแสงเหนือแสงสีม่วง (อัลตราไวโอเล็ต) และสำหรับแสงที่มองเห็นได้จะมีระดับพลังงานอยู่ตั้งแต่ 10 อิเล็กตรอนโวลต์ไปจนถึง 120 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อระดับพลังงานเปลี่ยนแปลงไปความถี่ของแสงที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนไปด้วยตามความสัมพันธ์

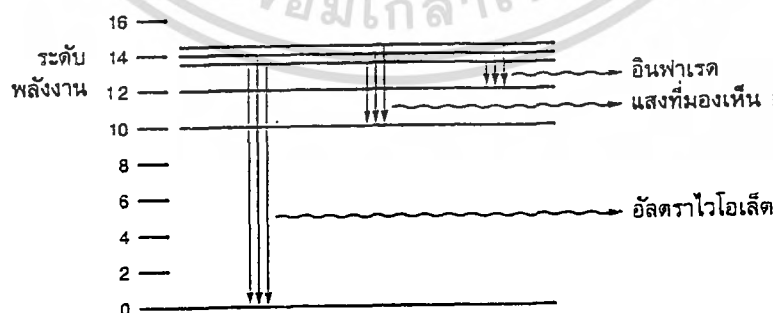
$$E_2 - E_1 = hf$$

โดยที่ E_2, E_1 เป็นระดับพลังงานของอะตอม

h เป็นค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 6.62620×10^{-34} จูลวินาที

f เป็นความถี่

จากความสัมพันธ์นี้เองเป็นตัวบ่งบอกว่าระดับพลังงานใดจะเกิดแสงแบบใดขึ้น สำหรับเลเซอร์จะมีการกำเนิดที่ใช้หลักการแตกต่างจากแสงอื่น ๆ คือ จะต้องป้อนพลังงานให้แก่แหล่งกำเนิดเลเซอร์เข้าไปมาก ๆ ให้มีค่าสูงพ้นระดับพลังงานระดับ 1 จากนั้นอะตอมจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานตกลงมาที่ระดับ 1 และจากระดับ 1 มาสู่ระดับ 0 หรือระดับกราวด์ ช่วงของการปลดปล่อยพลังงานจากระดับ 1 สู่ระดับกราวด์นี้จะเกิดลำแสงออกมา



รูปที่ 2.40 แสดงการเกิดของแสงเลเซอร์

ถ้าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน 0 กับ 1 มีค่าอยู่ที่ 1.8 eV จากความสัมพันธ์ระหว่าง hf กับความแตกต่างของระดับพลังงาน ทำให้สามารถคำนวณความยาวคลื่นของแสงที่กำเนิดออกมาได้ดังนี้

แปลงค่า 1.8 eV ให้เป็นค่าประจุไฟฟ้า

$$\text{จากความสัมพันธ์ } 1\text{eV} = 1.60219 \times 10^{-19}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นค่า } 1.8\text{ eV} &= 1.8 \times 1.60219 \times 10^{-19} \\ &= 2.883942 \times 10^{-19} \text{ จูลอมป์} \end{aligned}$$

จากนั้นนำมาเข้าสู่สูตรหาค่าความถี่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} f &= \frac{2.883942 \times 10^{-19}}{h} \\ &= 4.605 \times 10^{14} \text{ เฮิรตซ์} \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่าความถี่ที่ได้ไปคำนวณหาความยาวคลื่น จากสูตร

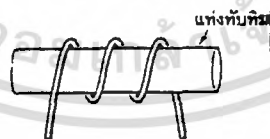
$$\text{ความยาวคลื่น } (\lambda) = \frac{c}{f}$$

$$\text{ความเร็วแสง } (c) = 3 \times 10^8$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ความยาวคลื่น} = 0.651 \text{ ไมโครเมตร}$$

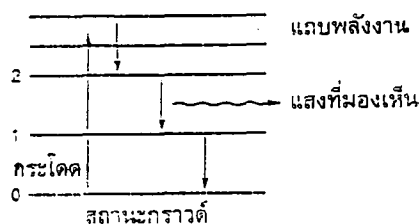
ซึ่งก็คือ ช่วงความยาวคลื่นแสงสีแสดนั่นเอง นั่นแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานยังเป็นตัวบ่งบอกสีของแสงเลเซอร์อีกด้วย

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ตัวแรกที่ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นคือ เลเซอร์ทับทิม (Ruby Laser) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.41



หม้อแปลงไฟฟ้า
พันรอบแท่งทับทิม

รูปที่ 2.41 เลเซอร์ตัวแรกใช้ทับทิม



รูปที่ 2.42 แสดงการเกิดเลเซอร์แบบ 4 ชั้นพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์สาธารณะ เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลอดไฟแฟลชทำหน้าที่เป็นตัวรับกำลังไฟฟ้าสูง และเมื่อเกิดการตกลงมาของพลังงาน จะมาตกที่แท่งทับทิม ซึ่งสามารถส่งผ่านแสงออกมาได้ ลักษณะการทำงานของเลเซอร์ทับทิมจะถูกเรียกว่า พัลส์เลเซอร์ คือ แสงเลเซอร์จะถูกกำเนิดออกมาเป็นช่วง ๆ ตามจังหวะของการปลดปล่อยพลังงานของอะตอม จึงมีการพัฒนาให้สามารถกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ต่อเนื่องได้

ในการกำเนิดแสงเลเซอร์อย่างต่อเนื่อง จะต้องใช้กระบวนการ 4 ขั้น พลังงาน ดังรูปที่ 2.42 โดยขั้นแรกป้อนกำลังไฟฟ้าสูงให้แก่แหล่งกำเนิดเลเซอร์ อะตอมจะถูกส่งไปยังย่านพลังงานสูง จากนั้นจะตกลงมาอย่างรวดเร็วสู่ระดับพลังงาน 2 และตกสู่ระดับ 1 ซึ่งจังหวะนี้เองที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงออกมา และจากนั้นอะตอมจะปลดปล่อยพลังงานตกลงสู่ระดับกราวด์ ทว่าในเวลาเดียวกันก็มีการป้อนพลังงานสูง ๆ ให้แก่แหล่งกำเนิดเลเซอร์เข้าไปอีก ก็จะเกิดการตกลงของพลังงานสู่ระดับ 2 และ 1 ก่อนที่พลังงานก่อนหน้านี้จะตกสู่ระดับกราวด์ จึงทำให้แสงเลเซอร์กำเนิดอย่างต่อเนื่องได้

แสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มและลักษณะของลำแสงค่อนข้างแคบเล็ก จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการตัดสิ่งของ หรือในทางการแพทย์ใช้แสงเลเซอร์ในการผ่าตัดเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทว่าด้วยความจำเป็นที่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าสูง ๆ ในช่วงแรกนี้เองทำให้เลเซอร์ถูกมองเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานต่ำมาก เพราะให้กำลังเอาต์พุตออกมาน้อยมาก เมื่อเทียบกับกำลังงานที่ป้อนให้ ประสิทธิภาพของเลเซอร์อยู่ที่ประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

2.5 การมอดดูเลชัน (Modulation)

การมอดดูเลชันคือ กระบวนการที่นำสัญญาณข้อมูลมารวมกับสัญญาณพาหะเพื่อให้สามารถส่งข้อมูลไปได้ไกลขึ้น เป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดแก่ข้อมูลในระหว่างการรับส่ง และช่วยป้องกันข้อมูลที่ต้องการให้เป็นความลับได้อีกด้วย

การมอดดูเลชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ การมอดดูเลชันทางอนาล็อก และการมอดดูเลชันทางดิจิทัล ซึ่งทั้ง 2 วิธีต่างมีข้อดีข้อเสียต่างกัน สามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสม

ข้อดีของการมอดดูเลชันทางอนาล็อก

- 1.) เป็นวิธีการที่ง่าย จึงสะดวกในการใช้การศึกษาหลักการและทฤษฎี
- 2.) มีวงจรการทำงานที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก

3.) ราคาไม่แพงนัก

ข้อเสียของการมอดคูเลชันทางดิจิตอล

- 1.) มีความคิดเห็นได้ง่าย เนื่องจากถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนได้ง่าย
- 2.) ช่วงแบนด์วิดท์แคบไม่สามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้ครั้งละมาก ๆ
- 3.) ทำงานได้ในช่วงความเร็วไม่สูงนักหรือใช้งานที่ความถี่สูงมาก ๆ ไม่ค่อยดี
- 4.) การเพิ่มความแรงของสัญญาณทำได้ยาก

ข้อดีของการมอดคูเลชันทางดิจิตอล

- 1.) มีช่วงแบนด์วิดท์ที่กว้างจึงสามารถส่งข้อมูลได้เป็นจำนวนมากและรวดเร็ว
- 2.) มีความคิดเห็นน้อยกว่าการส่งสัญญาณแบบอนาล็อก ซึ่งอาจจะเพี้ยนอันเนื่องมาจากความไม่เที่ยงตรงของคุณสมบัติทางกำลังต่อกระแส (Power - Current Characteristic) ของระบบส่ง และในการส่งแบบอนาล็อกนั้นจะต้องการรูปคลื่นที่แน่นอน ซึ่งสัญญาณดิจิตอลจะมีผลกระทบน้อยกว่า เนื่องจากมีความต้องการระดับพลังงานเพียงแค่ 2 ระดับ คือ Low กับ High เท่านั้น (0 กับ 1)
- 3.) สัญญาณดิจิตอลสามารถเชื่อมโยงกับระบบต่าง ๆ ได้ง่าย
- 4.) สามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณได้ง่าย (Repeater)

ข้อเสียของการมอดคูเลชันทางดิจิตอล

- 1.) หลักการและทฤษฎีที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน
- 2.) มีวงจรการทำงานที่ยุ่งยากและซับซ้อน และต้องใช้ระบบที่ค่อนข้างใหญ่กว่าทางอนาล็อก

จะพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของทั้ง 2 วิธีแล้ว พบว่า การมอดคูเลชันทางดิจิตอลเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการความถูกต้องมาก ๆ ขณะที่การมอดคูเลชันทางอนาล็อกเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดและถูกต้องมากนัก

2.5.1 การมอดคูเลชันทางอนาล็อก ในขบวนการมอดคูเลชัน จะใช้คลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่สูงเป็นพาหะแล้วเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่างของพาหะด้วยสัญญาณข่าวสาร โดยทั่วไปสัญญาณข่าวสารได้แก่ สัญญาณออดิโอ(หรือเสียงพูด) สัญญาณภาพ หรือข่าวสารอื่น ๆ คลื่นรูปไซน์ที่เราใช้เป็นพาหะนั้น เราสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์แทนได้ดังนี้

$$e = A \sin(\omega t + \phi)$$

เมื่อ e คือค่าแรงดัน(หรือค่ากระแส)ของคลื่นพาหะ

A คือแอมพลิจูด(หรือขนาด) สูงสุดของคลื่นพาหะ

ω คือความถี่เชิงมุม $= 2\pi f$

t คือเวลา

ϕ คือเฟส หรือมุมทางไฟฟ้า

f คือ ความถี่

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า คุณสมบัติประจำตัวของคลื่น (รูปชาชน) ที่สำคัญจะมีอยู่ 3 ประการ ซึ่งเราสามารถเปลี่ยนแปลงหรือมอดคูเลชันได้ คือแอมพลิจูด (A) ความถี่เชิงมุม (ω) หรือความถี่ (f) และเฟส(ϕ)

การมอดคูเลชันทางอนาล็อกแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1.) มอดคูเลชันทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation เรียกชื่อย่อว่า AM)
- 2.) มอดคูเลชันทางความถี่ (Frequency Modulation เรียกชื่อย่อว่า FM)
- 3.) มอดคูเลชันทางเฟส (Phase Modulation เรียกชื่อย่อว่า PM หรือ ϕ M)

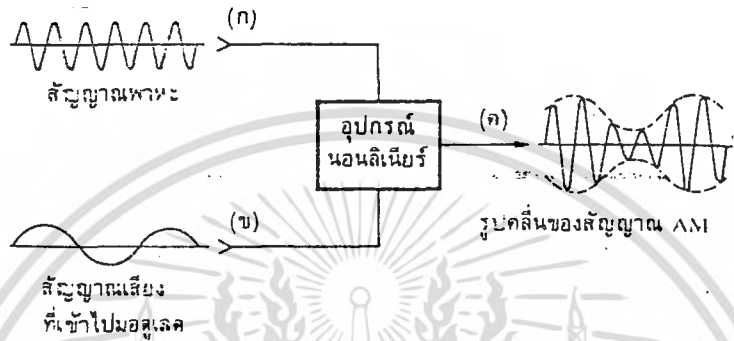
ในทางปฏิบัติสัญญาณ FM กับสัญญาณ PM จะคล้ายคลึงกันมากบางที่เราเรียกรวม ๆ ทั้ง FM และ PM ว่า การมอดคูเลชันเชิงมุม (Angle Modulation) กล่าวโดยสรุป การมอดคูเลชันทางอนาล็อกอาจแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ AM กับ FM (หรือ PM)

1.) แอมพลิจูดมอดคูเลชัน (Amplitude Modulation) การมอดคูเลชันแบบนี้ จะนำเอาสัญญาณข้อมูลรวมกับสัญญาณพาหะ ทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามการรวมกันของสัญญาณ ระดับสัญญาณของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงจากประมาณ 0 ไปจนถึงเกือบสองเท่าของสัญญาณที่ยังไม่ได้ผ่านการมอดคูเลชัน

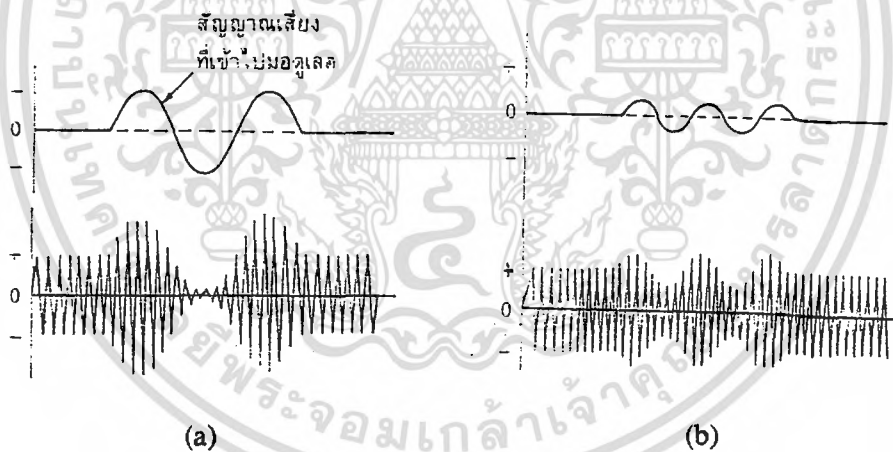
สัญญาณพาหะ(Carrier Signal) ซึ่งเป็นสัญญาณรูปชาชน ที่มีความถี่สูงทำให้สัญญาณที่ผ่านการมอดคูเลชันแล้ว มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพาหะตามแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล แต่ความถี่ของสัญญาณพาหะยังคงที่ ซึ่งต่อไปจะยกตัวอย่างโดยใช้สัญญาณข้อมูลเป็นสัญญาณเสียง ตัวอย่างเช่น ใช้สัญญาณพาหะ (a) ผสมกับสัญญาณเสียง (b) ลงในวงจรมอดคูเลชัน (Nonlinear) เช่นใช้ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์โดยให้มีจุดทำงานอยู่ในบริเวณที่ไม่เป็นลิเนียร์ ในอุปกรณ์แบบอนลิเนียร์จะทำให้เกิดสัญญาณ AM ดังรูปที่ 2.43 จะสังเกตว่าสัญญาณพาหะซึ่งถูกมอดคูเลชันแล้วจะมีแอมพลิจูด (ขนาด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณเสียง สัญญาณเสียงที่ป้อนอยู่ในสัญญาณ AM จะปรากฏเป็นกรอบคลื่น (Envelope) บนและล่าง ดังเช่นรูปที่ 2.44 (a) เป็นสัญญาณเสียงที่มีแอมพลิจูดขนาดหนึ่ง และรูปที่ 2.44 (b) คือ สัญญาณเสียงที่มีแอมพลิจูดเล็กลง สัญญาณที่เกิดขึ้นหลังจากทำการมอดคูเลชันแล้ว รูปที่ 2.44 (b) จะมีกรอบเล็กกว่ารูปที่ 2.44 (a)



รูปที่ 2.43 แสดงการมอดคูเลตทางแอมพลิจูดโดยใช้อุปกรณ์นอนลิเนียร์



รูปที่ 2.44 แสดงการใช้สัญญาณเสียงที่มีขนาดมากและน้อย เพื่อมอดคูเลชัน

เปอร์เซ็นต์ของการมอดคูเลชัน จากรูปที่ 2.44 ปริมาณการมอดคูเลชันของสัญญาณเสียงลงบนพาหะไม่เท่ากัน สังเกตได้จากแอมพลิจูดของพาหะเปลี่ยนแปลงมากในรูป (a) และเปลี่ยนแปลงน้อยในรูป (b) ปริมาณการมอดคูเลชันนี้นิยามวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ (บางที่เรียก แฟกเตอร์การมอดคูเลชันมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1) รูปที่ 2.45 พาหะที่ยังไม่มีการมอดคูเลชันเรียกว่า มีเปอร์เซ็นต์การมอดคูเลชันเท่ากับศูนย์ (0 เปอร์เซ็นต์) รูปที่ 2.45 (a)

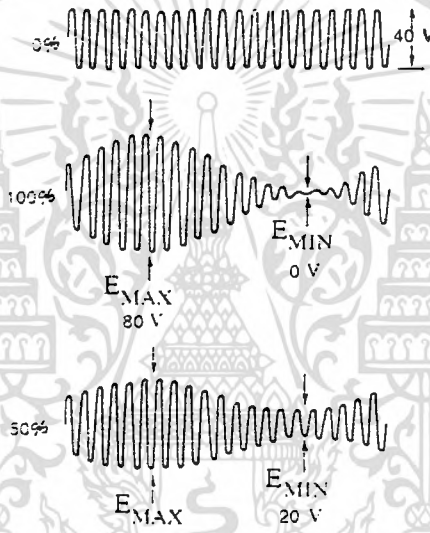
สมมติว่าพาหะมีแอมพลิจูดจากขอดบวกถึงขอดลบเท่ากับ $40 V_{p-p}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.45 (b) พาดูมอดคูเลชันด้วยสัญญาณเสียงเต็มที่ 100 เปอร์เซ็นต์ แอมพลิจูดของพาดูจะตกลงมาถึงศูนย์ และแอมพลิจูดของคอบวกถึงยอดลบของพาดูจะได้ค่าสูงสุด $80 V_{p-p}$ อย่างไรก็ตาม ค่าแอมพลิจูดโดยเฉลี่ยของพาดูยังคงเป็น $40 V_{p-p}$ เท่าเดิม

รูปที่ 2.45 (c) พาดูมอดคูเลชันเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ แอมพลิจูดของคลื่นพาดูสูงสุด $60 V_{p-p}$ และต่ำสุด $20 V_{p-p}$ แอมพลิจูดเฉลี่ยของพาดูเท่ากับ $40 V_{p-p}$ (จาก $(60+20)/2 = 40 V_{p-p}$) เช่นเดิม สามารถใช้สูตรคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การมอดคูเลชัน} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} * 100\%$$

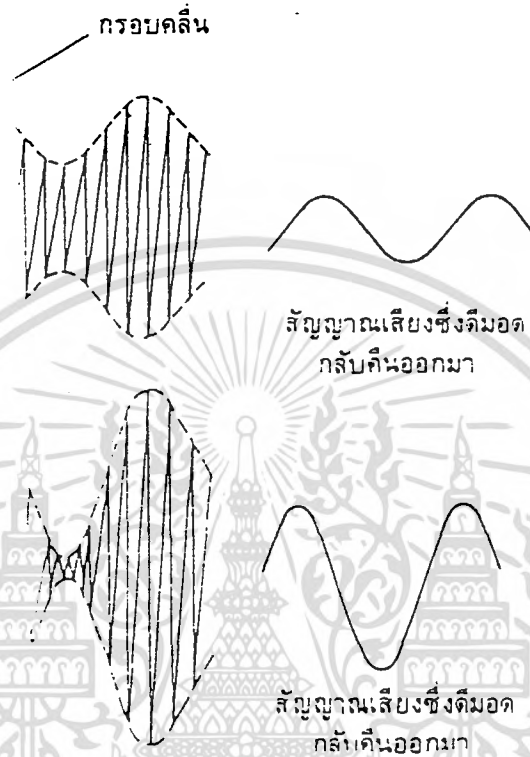


รูปที่ 2.45 แสดงการวัดเปอร์เซ็นต์การมอดคูเลชัน

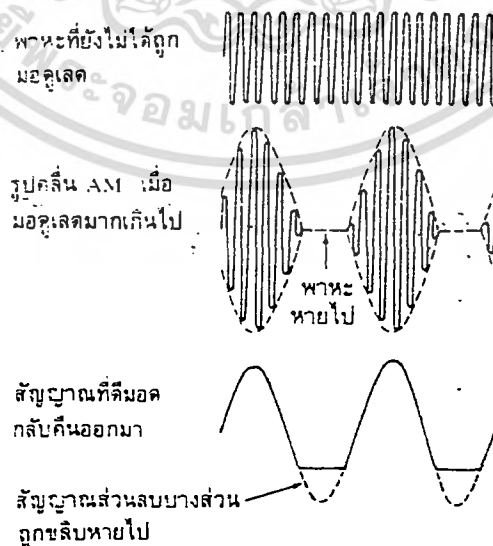
ปกติจะต้องการให้เปอร์เซ็นต์การมอดคูเลชันมีค่าสูงสุด เพื่อว่าสัญญาณเสียงที่รับที่เครื่องรับจะมีกำลังแรง (เสียงดัง) จากรูปที่ 2.46 เนื่องจากเครื่องรับ AM จะเปลี่ยนคลื่น AM เป็นสัญญาณเสียง โดยการแยกเอาแต่เฉพาะสัญญาณที่เข้าไปมอดคูเลชันลงบนพาดูกลับคืนจากคลื่น AM (คือคือมอดคูเลชันนั่นเอง) แต่อย่างไรก็ตามการมอดคูเลชันต้องไม่สูงเกินไป (ไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์) เพราะจะทำให้สัญญาณเสียงที่รับได้ที่เครื่องรับเกิดความเพี้ยน การมอดคูเลชันมากเกินไปนี้เรียกว่า การมอดคูเลชันเกิน (Overmodulation) จะเห็นว่าแอมพลิจูดสัญญาณ AM ลดลงได้ไม่ต่ำกว่าศูนย์ ไม่ว่าจะมอดคูเลชันแรงเท่าใดก็ตาม ยิ่งถ้าสัญญาณที่มอดคูเลชันมีค่ามากกว่าคลื่นพาดูจะหายไป (Cut Off) บางส่วนด้วย ดังนั้นกรอบคลื่นของสัญญาณ AM จึงมีรูปร่างผิดไปจาก สัญญาณเสียงที่เข้าไป มอดคูเลชัน ดังรูป 2.47 (a) เป็นสัญญาณที่เข้าไปมอดคูเลชัน รูป 2.47 (b) เป็นพาดูที่ยังไม่มีการมอดคูเลชัน รูป 2.47 (c)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพายุที่มอดดูเลชันด้วยสัญญาณเสียงที่มีความแรงมากเกินไปทำให้พายุบางช่วงหายไป
เมื่อเครื่องมือมอดดูเลชันสัญญาณเสียงกลับมาจะมีลักษณะเหมือนกับกรอปลิ้นซึ่งเห็นไป
จากเดิม ดังรูป 2.47 (d)



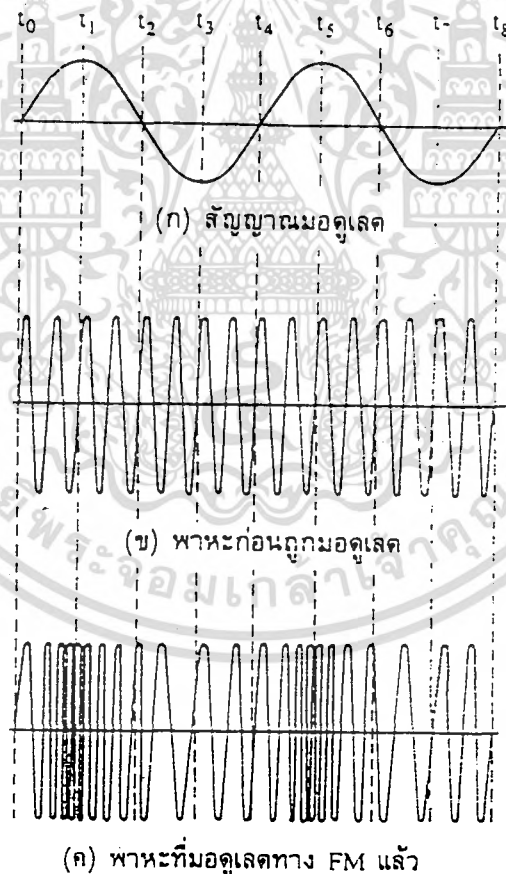
รูปที่ 2.46 แสดงแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงที่มอดดูเลชันคืนมาได้ที่เครื่องรับ จะมีความ
แรงมากขึ้นขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของการมอดดูเลชัน



รูปที่ 2.47 แสดงการโอเวอร์มอดดูเลชันจะทำให้สัญญาณที่ได้จากการมอดดูเลชันที่เครื่อง
รับมีความเพี้ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ฟรีแควนซีมอดูเลชัน (Frequency Modulation) หลักการของการมอดูเลชันทางความถี่มีจุดสำคัญอยู่ที่ แอมพลิจูดของสัญญาณจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่จะเปลี่ยนแปลงที่ความถี่แทน กล่าวคือ การมอดูเลชันแบบนี้จะนำความถี่ของคลื่นพาหะมารวมกับความถี่ของข้อมูลปกติ ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของสัญญาณมอดูเลชันจะเป็นสัดส่วนกับแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล จะเห็นว่าที่แอมพลิจูดของข้อมูลสูง ความถี่จะสูง ที่แอมพลิจูดต่ำ ความถี่ก็จะต่ำ ดังรูป 2.48 (a) เช่นสัญญาณเสียงซึ่งเป็นข้อมูลเข้าไปมอดูเลชันลงบนสัญญาณพาหะ ดังรูปที่ 2.478(b) สัญญาณพาหะหลังจากมอดูเลชันแล้วในรูป 2.48 (c) เป็นสัญญาณ FM จะเห็นว่าที่เวลา t_0 สัญญาณ FM อยู่ที่ความถี่กลาง เมื่อสัญญาณที่เข้ามามอดูเลชันมีค่าทางบวกสูงสุด ความถี่ของพาหะจะเพิ่มขึ้นสูงสุด นั่นคือสัญญาณมอดูเลชันถึงจุดยอดสุด (สัญญาณมอดูเลชันมีขนาดสูงสุดนั่นเอง) ที่เวลา t_1



รูปที่ 2.48 แสดงการมอดูเลชันทางความถี่

ที่เวลา t_2 สัญญาณมอดูเลชันลดลงเป็นศูนย์ ความถี่ของพาหะก็จะลดลงมาที่ความถี่เอกสกลางดั้งเดิม หลังจากเวลาสัญญาณมอดูเลชันมีค่าตกลงต่ำกว่าศูนย์กลายเป็นลบ พาหะจะมีค่าต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ลดลงต่ำกว่าความถี่กลางและเมื่อเวลาสัญญาณมอดูเลชันกลับเป็นศูนย์อีกครั้งหนึ่ง ความถี่ของพาหะก็จะกลับมาถึงความถี่กลางดั้งเดิมเช่นกัน ในช่วงเวลา t_4 ถึง t_5 ก็จะซ้ำแบบเดิมเรื่อย ๆ ไป สรุปแล้วความถี่ของพาหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณมอดูเลชัน และพาหะยังคงอยู่ที่ความถี่กลาง เมื่อสัญญาณมอดูเลชันเป็นศูนย์

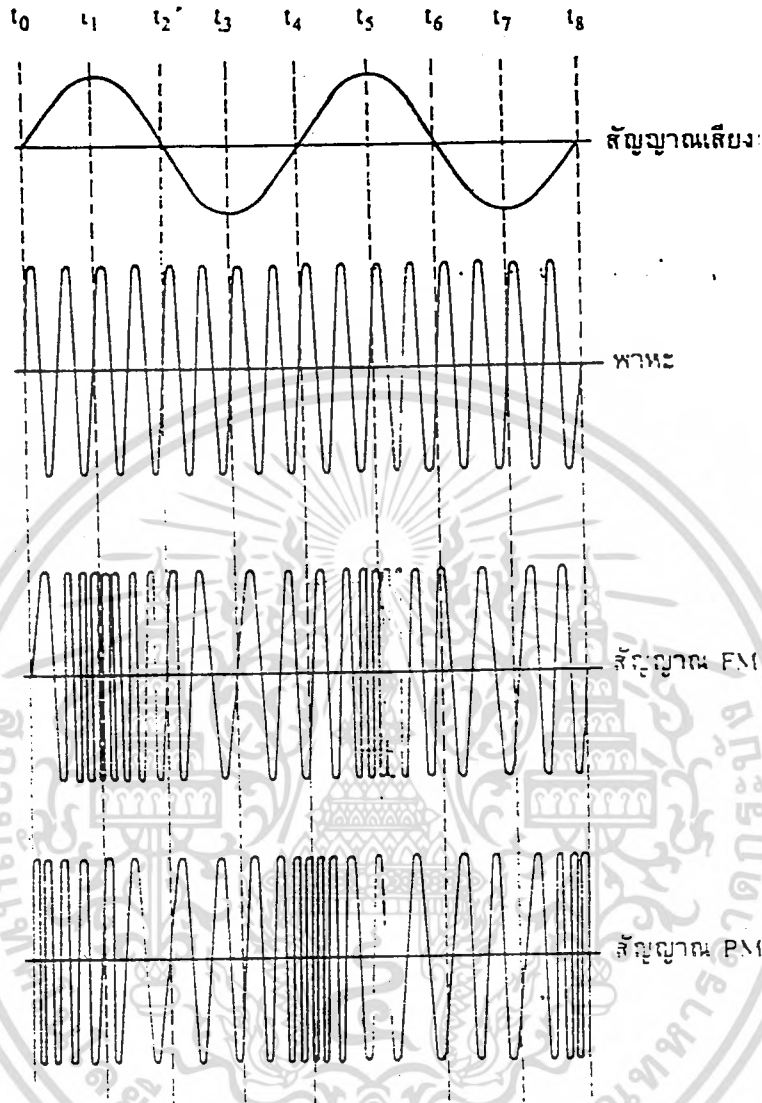
ช่วงความถี่ที่พาหะเบี่ยงเบนไปจากความถี่กลางเรียกว่า ความถี่เบี่ยงเบน (Frequency Deviation) ตัวอย่างเช่น พาหะมีความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ และเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 100.1 เมกะเฮิร์ตซ์ สลับไปมาเช่นนี้ หมายความว่าช่วงความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ ± 0.1 กิโลเฮิร์ตซ์ หรือ ± 100 กิโลเฮิร์ตซ์

อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ FM ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน ตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณที่เข้ามอดูเลชันเป็น โทน (สัญญาณเสียง) ความถี่ 1,000 เฮิร์ตซ์ อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณ FM จะเท่ากับ 1,000 ครั้งต่อวินาที ถ้าสัญญาณที่เข้ามอดูเลชันเพิ่มความถี่เป็น 10 กิโลเฮิร์ตซ์โดยคงค่าแอมพลิจูดเท่าเดิม ช่วงความถี่เบี่ยงเบนก็ยังเท่าเดิม คือเท่ากับ ± 100 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่อัตราการเบี่ยงเบนจะเพิ่มเป็น 10,000 ครั้งต่อวินาที นั่นคือ ความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชันเป็นตัวกำหนดอัตราการเบี่ยงเบนความถี่

กล่าวโดยสรุป สัญญาณ FM มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- (1.) มีแอมพลิจูดคงที่ตลอด แต่ความถี่เปลี่ยนตามสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน
- (2.) อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณพาหะมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน
- (3.) ช่วงความถี่เบี่ยงเบน เป็นสัดส่วนกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน

3.) เฟสมอดูเลชัน (Phase Modulation) การมอดูเลชันทางเฟส เฟสของพาหะจะถูกทำให้เปลี่ยนแปลง ไปตามสัญญาณข้อมูลที่เข้ามอดูเลชัน เมื่อเฟสของพาหะเปลี่ยนแปลง ความถี่ของพาหะก็เปลี่ยนแปลงด้วย ฉะนั้นการมอดูเลชันทางเฟสจะทำให้เกิดความถี่เบี่ยงเบนด้วยเสมอ จริง ๆ แล้วในการมอดูเลชันทางความถี่ เฟสก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย สรุปแล้วการเปลี่ยนแปลงทั้งสองแบบจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน



รูปที่ 2.49 แสดงความแตกต่างระหว่างคลื่น PM และ FM

จากรูปที่ 2.49 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณ FM กับ PM จะเห็นว่าสัญญาณทั้งสองมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ เว้นแต่ในการมอดูเลชันทางเฟส ความถี่เบี่ยงเบนมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน ด้วยเหตุนี้การมอดูเลชันทางเฟส ความถี่เบี่ยงเบนมีค่ามากที่สุด ในขณะที่สัญญาณมอดูเลตผ่านศูนย์ (แกนศูนย์) กล่าวคือ เฟสของพาหะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ในขณะที่สัญญาณมอดูเลชันเปลี่ยนจากบวกเป็นลบหรือลบเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแตกต่างของสัญญาณ PM กับ FM ได้แก่

- (1.) สัญญาณ PM มีความถี่เบี่ยงเบนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับทั้งความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน
- (2.) สัญญาณ FM มีความถี่เบี่ยงเบนที่เข้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน โดยไม่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามอดูเลชัน

2.5.2 การมอดูเลชันทางคิจิตอล อาจเรียกเป็น การมอดูเลชันทางพัลส์ (Pulse Modulation) เป็นกระบวนการที่ใช้เทคนิคทางคิจิตอลเข้าช่วย นั่นคือ จะต้องแปลงสัญญาณข้อมูลอนาล็อกเป็นคิจิตอลเสียก่อนแล้วจึงทำการมอดูเลชัน จากนั้นจึงส่งออกไป ส่วนปลายทางก็จะทำการดีมอดูเลชัน แปลงสัญญาณคิจิตอลเป็นอนาล็อก ก็จะได้สัญญาณข้อมูลเดิมออกมา

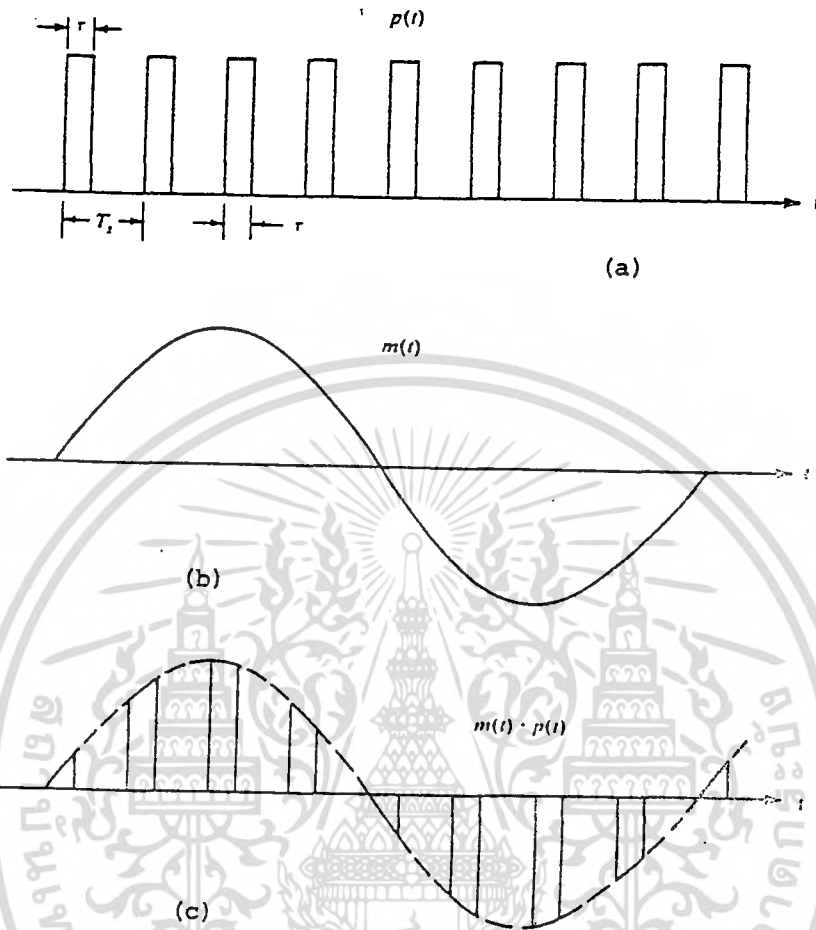
การมอดูเลชันทางคิจิตอลจะต้องการแบนด์วิดท์กว้างมากกว่าทางอนาล็อก เช่นในการส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนาล็อก 4 kHz ถ้าในระบบคิจิตอล ซึ่งต้องการการสุ่มตัวอย่าง (sampling) ดังนั้นมันจะต้องการค่าแบนด์วิดท์ถึง 64 kHz แต่การมอดูเลชันแบบนี้ก็มีข้อดีหลายอย่างและกำลังเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน

การมอดูเลชันทางคิจิตอลสามารถแบ่งออกได้ หลายวิธี ดังนี้

- 1.) การมอดูเลชัน แบบความสูงพัลส์ (Pulse Amplitude Modulation ,PAM)
- 2.) การมอดูเลชัน แบบตำแหน่งพัลส์ (Pulse Position Modulation , PPM)
- 3.) การมอดูเลชัน แบบความกว้างพัลส์ (Pulse wide Modulation , PWM)
- 4.) การมอดูเลชัน แบบพัลส์โค้ด (Pulse Code Modulation , PCM)

ซึ่งจะกล่าวถึงอย่างคร่าว ๆ ได้ดังนี้

1.) Pulse Amplitude Modulation การมอดูเลชันแบบนี้คือการที่แถว (Train) ของพัลส์ที่แคบและมีความสูงคงที่ สัญญาณพัลส์ถูกเปลี่ยนความสูงโดยคลื่นมอดูเลต $m(t)$ ที่มีอัตราความเร็วต่ำกว่า นั่นคือการที่เอาขบวนของพัลส์คูณกับสัญญาณมอดูเลตตามรูปที่ 2.50 ซึ่งแสดงถึงแถวพัลส์ (Pulse Train) คลื่นมอดูเลตชายน์ และรูปคลื่น PAM ตามลำดับ



รูปที่ 2.50 (a) แสดงแถวพัลส์ $P(t)$

(b) แสดงคลื่นมอดคูเลต $m(t)$

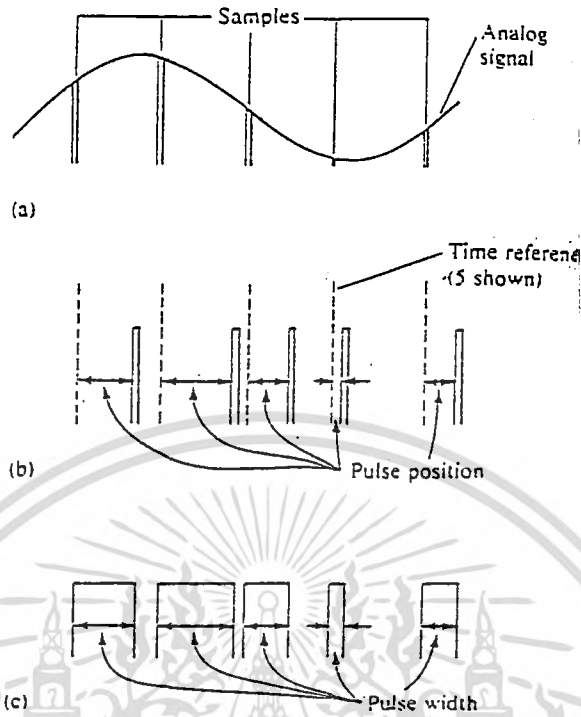
(c) แสดงรูปคลื่น PAM

จากรูปจะเห็นได้ว่าความสูงของคลื่น PAM ขึ้นอยู่กับความสูงพัลส์ โดยการผ่านวงจรถองผ่านความถี่ต่ำ จะได้รูปคลื่นตามรูป (b) กลับมาอีกครั้งหนึ่ง

อย่างไรก็ตามสัญญาณ PAM ไม่ค่อยจะนิยมใช้เท่าไรนัก เหตุผลก็คือ สัญญาณข้อมูลถูกเปลี่ยนเป็นองค์ประกอบของความสูงพัลส์ ซึ่งง่ายต่อการเกิดการเพี้ยนได้ในขณะส่ง เพราะจะมีคลื่นรบกวนหรือครอสทอล์ค (Crosstalk) เข้ามารบกวนโดยง่าย

2.) Pulse Position Modulation เป็นการมอดคูเลชันที่ทำให้ความกว้างของพัลส์มีอัตราค่าที่แต่ตำแหน่งของพัลส์จะเปลี่ยนไปตามสัญญาณข้อมูลอนาล็อก ดังแสดงใน

เอกสารรูปที่ 2.51 สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



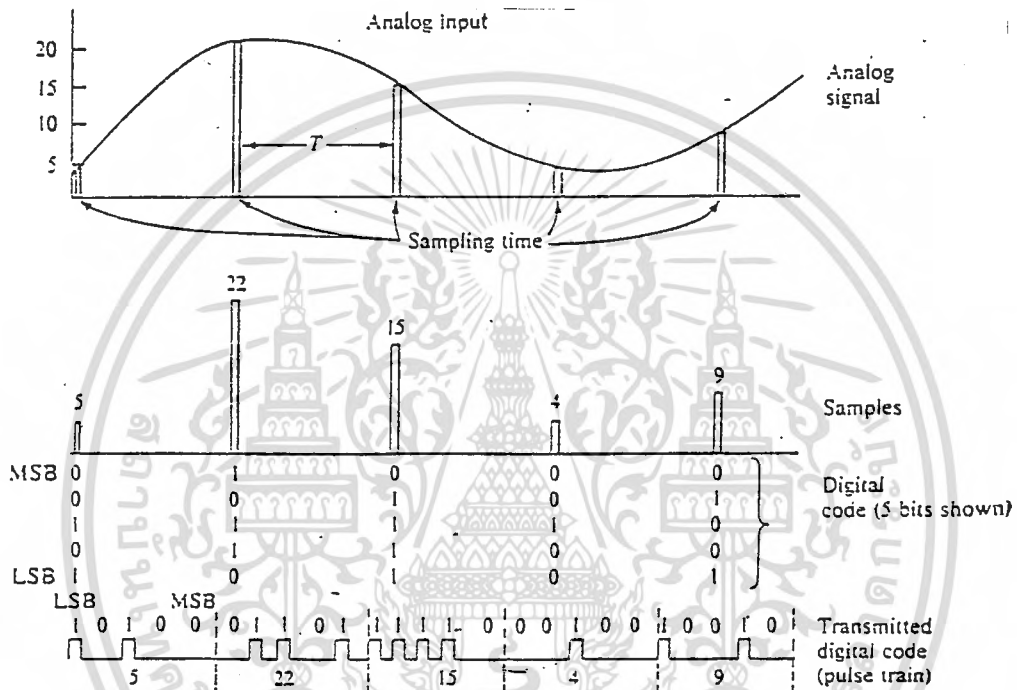
รูปที่ 2.51 (a) แสดงสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณ Samples
 (b) แสดงเทคนิค การมอดดูเลชั่นแบบ PPW
 (c) แสดงเทคนิค การมอดดูเลชั่นแบบ PWM

3.) Pulse Wide Modulation เป็นการมอดดูเลชั่นที่ป้องกันสัญญาณรบกวนได้ดี สัญญาณที่มอดดูเลตแล้วจะมีอัตราคงที่ แต่ความกว้างของพัลส์เปลี่ยนแปลงตามแอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูล กล่าวคือ ถ้าพัลส์กว้างมาก หมายถึงแอมพลิจูดสูง ถ้าพัลส์แคบแอมพลิจูดก็จะต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.51

4.) Pulse Code Modulation การมอดดูเลตแบบนี้ จะใช้กระบวนการแปลงสัญญาณอนาล็อกที่เป็นข้อมูลให้เป็นสัญญาณดิจิทัลจะมีตั้งแต่ 4 บิต ขึ้นไป แอมพลิจูดของสัญญาณข้อมูลอนาล็อกจะถูกแทนด้วยรหัสเลขฐานสอง ดังนั้นความละเอียดแม่นยำของสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของข้อมูลดิจิทัลเป็นสำคัญ ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.52 โดยในตอนแรกสัญญาณอินพุตจะถูกสุ่มตัวอย่างหรือ แซมปลิง ด้วยอัตราการแซมปลิงเหมือนกับระบบ PAM จากนั้นขนาดของสัญญาณที่ถูกสุ่มออกมา (ซึ่งก็คือ แอมพลิจูดของพัลส์ในระบบ PAM) จะถูกทำการเข้ารหัสเป็นข้อมูลทางดิจิทัลด้วยระบบเลขฐานสอง ข้อมูลดิจิทัลที่ถูกเข้ารหัสแล้ว จะทำหน้าที่ ควบคุมแหล่งกำเนิดแสงให้ส่งข้อมูลออกไปในลักษณะของสวิตช์ปิด-เปิด ดังนั้นในระบบนี้ ถ้ามีสัญญาณแสงเป็นข้อมูลจะไม่คำนึงถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยฯ
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความเข้มแสงเลย นอกจากการปิด-เปิด แสงในช่วงเวลาที่กำหนดในแต่ละบิตข้อมูล ทำให้ลดการเกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ PAM ลงได้มาก สัญญาณดิจิทัลที่รับได้ในภาครับจะถูกแปลงกลับสู่สัญญาณอนาล็อกอีกครั้งหนึ่ง ก่อนถูกส่งผ่านวงจรกรองความถี่ เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีลักษณะเดียวกับสัญญาณอินพุตก่อนนำไปขยายสัญญาณเพื่อใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.52 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณของการมอดูเลชันแบบ PCM

2.6 การมัลติเพล็กซ์

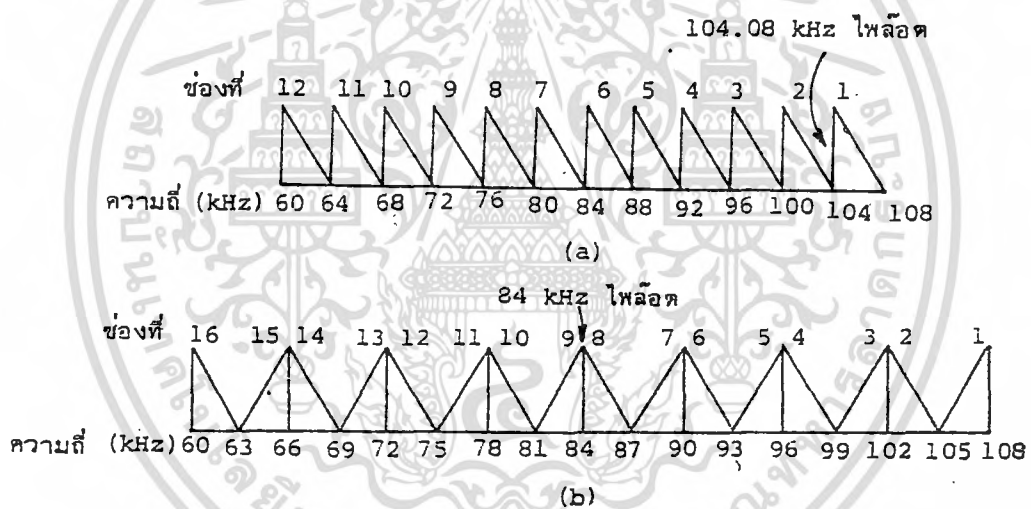
การมัลติเพล็กซ์ คือการรวมสัญญาณช่องความถี่หลาย ๆ ช่องเข้าด้วยกัน แล้วส่งออก ไปพร้อมๆ กัน โดยแต่ละช่องจะไม่มีกรรบกวนซึ่งกันและกัน การมัลติเพล็กซ์แบ่งได้เป็น ดังนี้ คือ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาหรือ TDM (Time-Division Multiplex) , การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่หรือ FDM (Frequency-Division-Multiplex)และ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น WDM (Wavelength-Division-Multiplex)

2.6.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ ปัจจุบันนี้ความจำเป็นในการส่ง โทรศัพท์ หรือ โทรเลข เป็นจำนวนหลาย ๆ ช่องจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ในเมืองใหญ่ ๆ ของ ประเทศที่พัฒนาแล้วบางครั้งอาจจะต้องส่งโทรศัพท์ โทรเลข หรือ ข้อมูลไปพร้อม ๆ กัน

เป็นจำนวนพันหรือหมื่นช่อง ถ้าใช้สายเคเบิล 1 คู่ ต่อการสื่อสาร 1 ช่องแล้วค่าใช้จ่ายจะสูง ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุคดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ดังนั้นจึงมีวิธีการรวมเอาสัญญาณของทุก ๆ ช่องเข้าด้วยกัน และส่งไปในสายเส้นเดียวกัน โดยไม่ให้รบกวนซึ่งกันและกัน วิธีนี้เรียกว่าการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ หรือ FDM โดยการแบ่งความกว้างแบนด์วิธ (Bandwidth) ให้พอกับจำนวนช่องที่ต้องการ แต่ละช่องก็จะมีความถี่เฉพาะซึ่งห่างจากความถี่ช่องข้างเคียง อย่างไรก็ตามเพื่อความคล่องตัว ความประหยัด และความง่ายในการรับ-ส่ง จึงต้องแบ่งความถี่เป็นกลุ่ม ให้เป็นมาตรฐานก่อนที่ทุกช่องจะถูกส่งไป

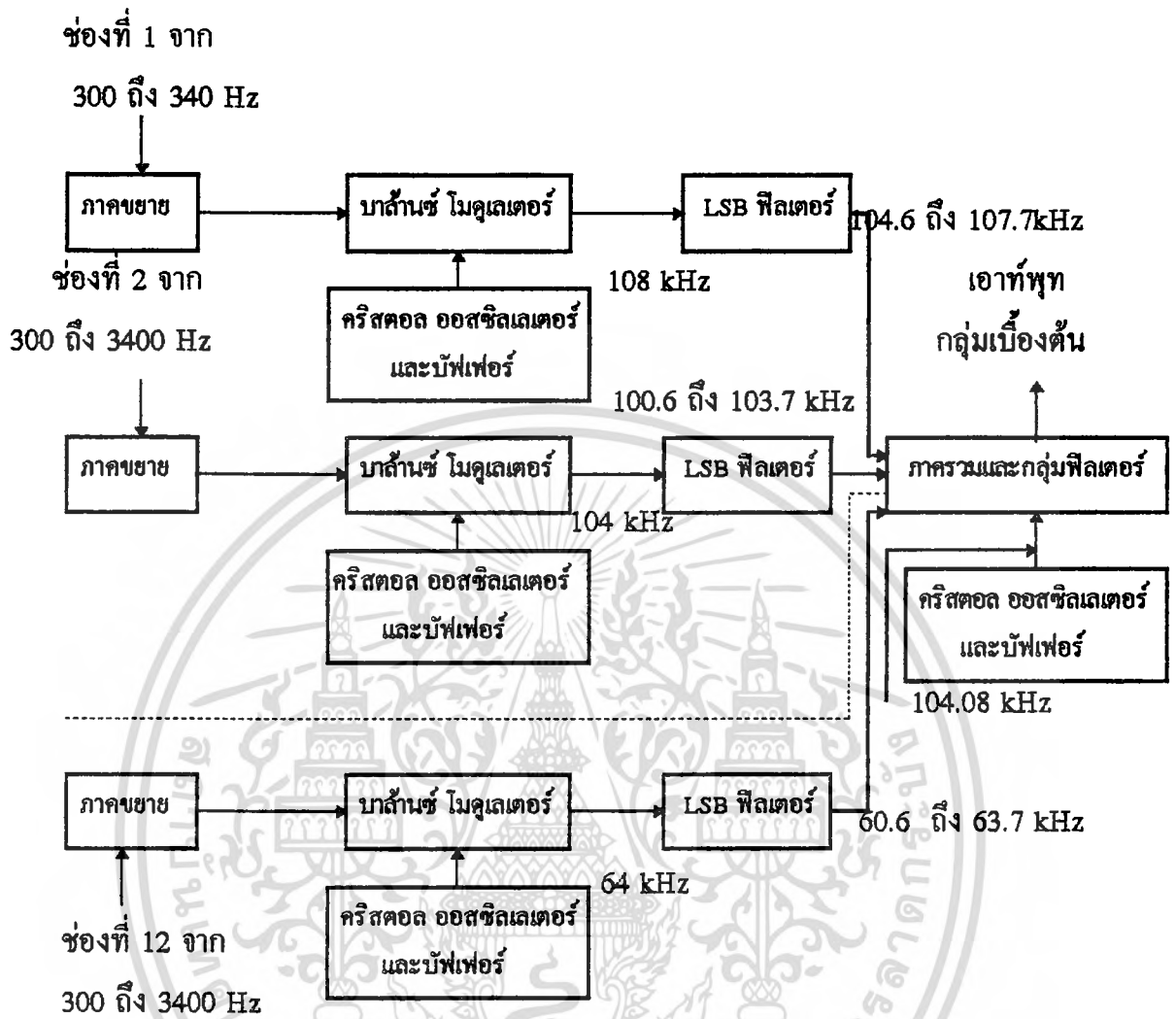
การแบ่งความถี่เป็นกลุ่มนี้ กลุ่มที่เล็กที่สุดจะมี 12 ช่อง ๆ ละ 1 kHz ใช้ความถี่จาก 60 ถึง 108 kHz ความถี่ไพล๊อต (Pilot) เพื่อใช้ในการตรวจสอบเท่ากับ 104.08 kHz ในเคเบิลใต้น้ำจะใช้ความถี่ของช่องน้อยกว่า 4 kHz จากตัวอย่างในรูป 2.53 (b) แบ่งเป็น 16 ช่อง ๆ ละ 3 kHz ทำให้มีความกว้างแบนด์เท่ากับ 48 kHz เหมือนกับการส่ง 12 ช่อง



รูปที่ 2.53 แสดงการแบ่งกลุ่ม (a) สำหรับกลุ่ม 12 ช่อง (b) สำหรับกลุ่ม 16 ช่อง

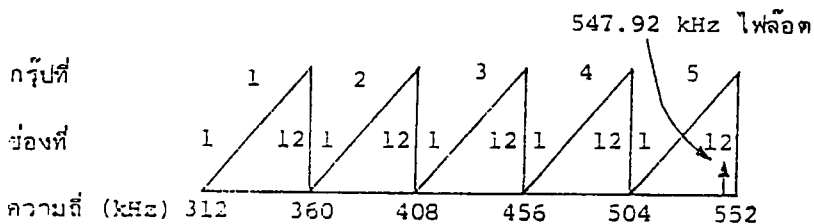
ในการรวมช่องสัญญาณนั้นขอให้ดูจากรูป 2.54 ซึ่งแสดงถึงการรวมช่องต่าง ๆ โดยใช้วิธีการที่เหมือนกันตั้งแต่ช่อง 1 ถึงช่อง 12 เพียงแต่ความถี่เปลี่ยนไปเท่านั้น และความถี่ระหว่างช่องข้างเคียงจะห่างกัน 900 Hz

ตามรูปที่ 2.54 นี้เป็นเพียงบล็อกไดอะแกรมง่าย ๆ เท่านั้นเอง ในทางปฏิบัติจะมีการ Modulate เป็นกลุ่มย่อย ๆ 4 กลุ่มก่อนแล้วจึงรวมกลุ่มย่อย ๆ นี้เป็นกลุ่มเดียว ในการรวมแบบ 16 ช่องก็เป็นเช่นนี้เหมือนกัน



รูปที่ 2.54 แสดงการรวมช่องสัญญาณตั้งแต่ช่อง 1 ถึงช่อง 12

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งกลุ่มที่ใช้ความถี่สูงขึ้นไปอีกเรียกว่า กลุ่มซูเปอร์ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มย่อย 5 กลุ่ม ใช้ความถี่จาก 312 ถึง 552 kHz ความกว้างแบนด์เท่ากับ 240 kHz รูปที่ 2.55 แสดงถึงที่ตั้งของช่องและกลุ่มซูเปอร์ โดยมีความถี่ไฟลิตเท่ากับ 547.94 kHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยผู้จัดทำเอกสารไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง

กลุ่มซูปเปอร์นี้เมื่อมารวมกันจะเรียกว่า กลุ่มมาสเตอร์ (Master Groups) และ กลุ่มซูปเปอร์มาสเตอร์ (Supermaster Groups) กลุ่มซูปเปอร์มาสเตอร์ หรือกลุ่มที่มีกลุ่มซูปเปอร์ 15 กลุ่มประกอบด้วย 900 ช่องสัญญาณ หรือช่วงกว้างแบนด์ประมาณ 4 MHz

2.6.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา คือการใช้พัลส์แคบ ๆ แต่ช่องห่างระหว่างพัลส์มีมากและทำการมอดูเลชัน แบบพัลส์ ช่องว่างระหว่างพัลส์ที่เว้นไว้สำหรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดอื่น ตัวอย่าง เช่น การส่งระบบ 24 ช่อง ซึ่งมีอัตราเร็วในการสุ่ม 8,000 ครั้งต่อวินาที จำนวน 8 บิต (256 ระดับการสุ่ม) ต่อการสุ่ม ช่วงกว้างพัลส์ประมาณ 0.625 Msec นั่นคือช่องว่างการสุ่มมีค่า $1/8,000 = 0.000125$ Msec และช่วงที่ต้องการระหว่างกลุ่มคือ $8 \times 0.625 = 5$ Msec ถ้าไม่ใช้การส่งโดยวิธีมัลติเพล็กซ์ และส่งเพียง 1 ช่อง ในการส่งจะประกอบด้วย 8,000 เฟรมต่อวินาที จะเห็นได้ว่า มีใช้สัญญาณเพียง 5 Msec แรกเท่านั้น ที่เหลืออีก 120 Msec ถูกทิ้งไว้ว่างเปล่าไม่มีประโยชน์ ดังนั้นระบบนี้ทำให้เหลือที่ว่างระหว่างกลุ่มเยอะมาก ในทางปฏิบัติจริงนั้นในแต่ละ 125 μ sec จะมี 24 ช่อง สำหรับช่องที่ 25 ใช้สำหรับการซิงโครไนซ์ในแต่ละเฟรม ประกอบด้วย 193 บิตหรือ แต่ละช่องเท่ากับ 24×8 บวกกับอีก 1 สำหรับซิงค์ และเนื่องจากมี 8,000 เฟรมต่อวินาที ดังนั้นอัตราเร็วของบิตคือ 1.544 Mbit/sec

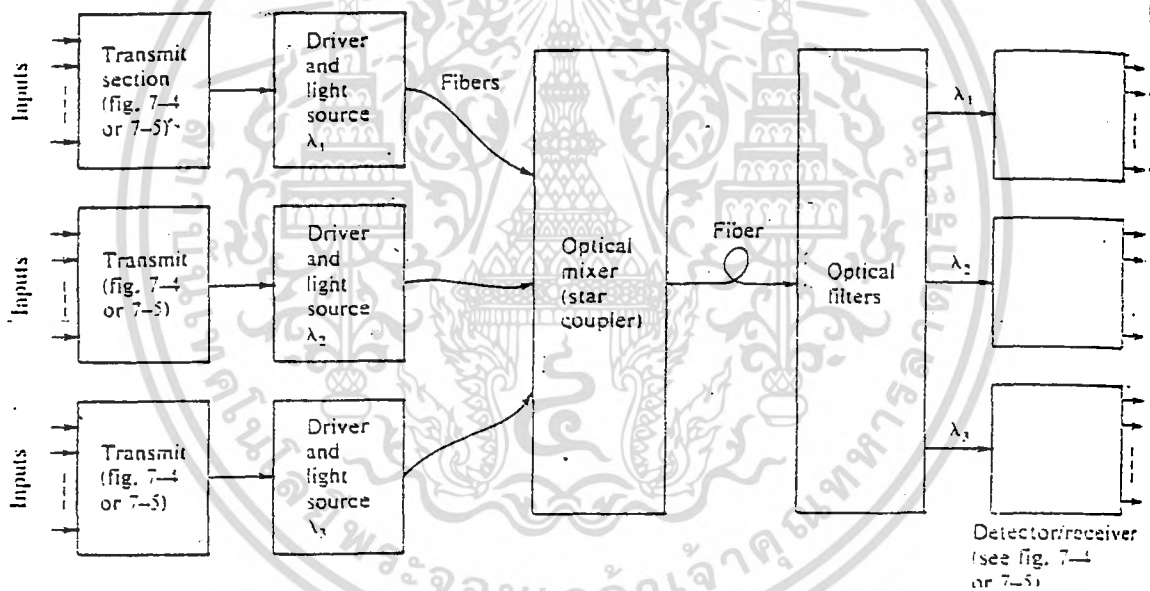
การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาที่มีความเร็วต่ำนั้นจะใช้สวิตช์หมุนไปรอบ ๆ ในกรณีที่มีความเร็วสูงจะใช้สวิตช์แบบ Electronic และสายคิเลย์ (Delay Line) ในการสแกน วงจรสุ่มแต่ละวงจรของหนึ่งช่องจะได้รับสัญญาณกระตุ้น (Trigger Pulse) พร้อม ๆ กันเพื่อเลือกสัญญาณที่ต้องการ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้แต่ละช่องไปเข้าวงจรบวก (Adder) อย่งไรก็ตาม เมื่อสัญญาณของการสุ่มครั้งแรกไปถึงวงจรบวก สัญญาณการสุ่มครั้งต่อไปจะเข้าไป 5 μ sec โดยใช้วงจรคิเลย์หรือสายคิเลย์เอาต์พุตของวงจรสุ่มที่สามจะเข้าไป 10 μ sec จนกระทั่งช่องที่ 24 จะเข้าไป 115 μ sec ด้วยวิธีนี้ช่วงห่างที่ใช้ 125 μ sec จึงพอเหมาะในการส่งช่องแต่ละช่อง วิธีการนี้จะซ้ำตัวเองด้วยอัตรา 8,000 ครั้งต่อวินาที

ในเครื่องรับ เอาต์พุตจากคิเทคเตอร์จะส่งให้วงจร 24 วงจร และแอนด์เกต (AND Gates) ในเวลาพร้อม ๆ กันเป็นวงจรง่าย ๆ ที่กำหนดให้มีหนึ่งเอาต์พุตออกมาก และเมื่อมีอินพุตเข้าไป 2 หรือมากกว่า เอาต์พุตจะมีต่อเมื่อมีอินพุตเข้าทุก ๆ จุด

2.6.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น เป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นพาหะนำข้อมูล โดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งออกด้วยออปติคัลคอปเปลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.56 ซึ่งคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่ง

สามารถบรรจุข้อมูลได้หนึ่งจุด และข้อมูลแต่ละจุดนี้อาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณก็ได้ เพราะการจัดระบบข้อมูลสามารถเลือกใช้ระบบ TDM หรือ FDM ก็ได้ มาทำการมอดูเลชันกับคลื่นแสงที่เป็นตัวนำส่งข้อมูล และเนื่องจากสัญญาณคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันยอมให้สีที่ต่างกัน บางครั้งระบบ WDM จะถูกเรียกว่า ระบบการผสมสีของแสง

ที่ภาครับ ข้อมูลแสงจะถูกแยกออกในแต่ละช่วงของความยาวคลื่น ด้วยวงจรรองแบบออปติคัล สัญญาณแสงที่ถูกแยกแล้วจะถูกคิมอดูเลชัน และถอดรหัสด้วยวิธีที่เหมาะสมกับขบวนการทางอินพุท (ในลักษณะของ TDM หรือ FDM) ระบบ WDM นี้เป็นเทคนิคใหม่ที่เพิ่งถูกนำมาใช้ เพราะสามารถส่งข้อมูลจำนวนมากมหาศาลได้ เท่าที่ปรากฏในปัจจุบัน WDM สามารถใช้กับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ไม่เกิน 3 ค่าเท่านั้น



รูปที่ 2.56 แสดงการทำงานของระบบ WDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบวงจรที่ใช้ในโครงการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรที่ใช้ในโครงการ คือ วงจรภาพและวงจรเสียงซึ่งแต่ละวงจรสามารถแบ่งเป็นส่วนสำคัญได้ 2 ส่วน ได้แก่ วงจรทางภาคส่งและวงจรทางภาครับ โดยวงจรและหลักการทำงานของทั้งภาพและเสียงอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.1 วงจรเสียง

3.1.1 วงจรส่งเสียง

1.) วงจรปริแอมพลิไฟร์

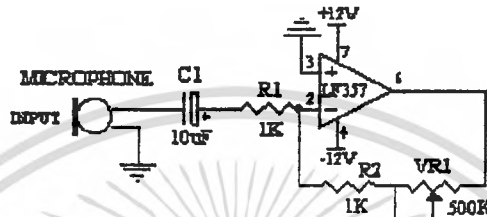
ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ไมโครโฟนที่มีอิมพีแดนซ์สูงนั้นไม่นิยมใช้ เพราะมีความเพี้ยนสูง ถึงแม้ว่าจะให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตสูง แสดงว่าคุณภาพของสัญญาณที่ได้ยังไม่ดีนัก สำหรับไมโครโฟนที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ จะให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตต่ำ แต่ให้สัญญาณที่มีคุณภาพค่อนข้างมาก แสดงว่ามีความเพี้ยนต่ำ ไมโครโฟนที่ใช้ในวงจรมีเป็นแบบอิมพีแดนซ์ต่ำ สามารถเลือกใช้ได้ทั้งชนิดต้องไบอัสและไม่ต้องไบอัสด้วยไฟเลี้ยง เพราะออกแบบให้สามารถเลือกใช้ได้ทั้ง 2 กรณี แต่ในที่นี้เลือกใช้ชนิดไม่ต้องไบอัส เพื่อกันสัญญาณรบกวนจากไฟเลี้ยงที่ใช้ไบอัสไมโครโฟน แต่ข้อเสียก็คือมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณเสียงไม่คืบนัก ขณะที่ชนิดต้องไบอัสมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณเสียงดีกว่า

วงจรปริแอมพลิไฟร์ เป็นการต่อแบบ กลัฟเฟส (Inverting) โดยใช้ไอซีออปแอมป์ LF357 มีอัตราขยาย (Av) 1-500 เท่า ด้วยการปรับค่าความต้านทานของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (VR1) การไบอัสออปแอมป์ใช้ไฟเลี้ยงแบบ Dual Supply (ไฟเลี้ยงบวกและลบ) จากวงจรรูปที่ 3.1 พบว่าตัวเก็บประจุ C_1 เป็นตัวกำหนดจุดคัทออฟ โดยในวงจรใช้ $C_1 = 10 \mu\text{F}$ จากสมการ

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นจะได้ความถี่คัทออฟ (f_c) = } & \frac{1}{2\pi(1000)(10 \times 10^{-6})} \\ = & 15.9 \text{ Hz} \end{aligned}$$



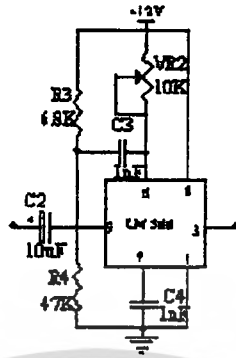
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรปรีแอมป์ไฟร์

2.) วงจร Pulse Frequency Modulation (PFM)

วงจรที่ให้เอาท์พุทออกมาเป็นสัญญาณ PFM แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในโครงการใช้ LM566 ซึ่งเป็น Voltage Controlled Oscillator (VCO) เพราะว่ามีคุณสมบัติในการมอดคูเลตและมีเสถียรภาพที่ดี แม้ว่าอุณหภูมิสูง โดยที่แอมพลิจูดหรือขนาดของสัญญาณเสียง (สัญญาณอินพุท) ทำให้ความถี่ของสัญญาณพาหะเกิดการสั่น (Oscillation) และความถี่ของสัญญาณพาหะจะเปลี่ยนแปลงไปตามแอมพลิจูดของสัญญาณที่นำเข้ามามอดคูเลต (สัญญาณอินพุท)

LM 566 ทำงานโดยใช้ Single Supply และ C_3 ที่อยู่ระหว่างขา 5 กับขา 6 มีค่า 1 nF เพื่อป้องกันการออสซิลเลตที่อาจเกิดขึ้นได้ ในระหว่างที่ VCO มีการ Switching LM 566 จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อ Voltage ที่ตกคร่อมขา 5 มีค่าเท่ากับ V_s โดยที่

$$V_s = \frac{3}{4} V_{cc} < V_s < V_{cc}$$



รูปที่ 3.2 แสดงวงจร Pulse Frequency Modulation (PFM)

จากวงจรจะได้ว่า

$$V_s = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{CC}$$

ในโครงการนี้ใช้

$$V_{CC} = +12V$$

$$R_3 = 6.8K$$

$$R_4 = 47K$$

ดังนั้นขา 5 จะมี

$$V_s = \frac{47K}{(6.8K + 47K)} (12V) = 10.48V$$

จากสมการ

$$f_0 = 2(V_{CC} - V_s) / (R_1 \times C_1 \times V_{CC})$$

เมื่อ f_0 คือ Frequency Center

C_1 คือ ตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่างขา 7 กับกราวด์

R_1 คือ ตัวต้านทานที่ต่อระหว่างขา 6 กับไฟเลี้ยง ซึ่งมีค่าคือ $2K < R_1 < 20K$

V_s คือ โวลต์เตจที่ตกคร่อมขา 5 กับขา 1

V_{CC} คือ ไฟเลี้ยง

ในวงจรเลือกค่าความถี่กลาง $f_0 = 300 \text{ kHz}$ และเลือก $C_1 = 1nF$

จากสมการข้างบน จะได้

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{2(V_{CC} - V_s)}{(f_0 \times C_1 \times V_{CC})} \\ &= \frac{2(12V - 10.48V)}{(300 \text{ kHz} \times 10^{-9} \times 12V)} \\ &= 844 \text{ ohm} \end{aligned}$$

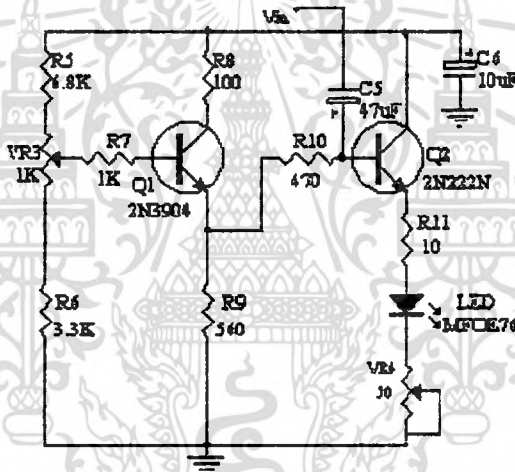
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เลือกใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่กลางตามต้องการได้ แต่ ตัวต้านทาน R_1 ที่เลือกใช้นั้นต้องมีค่าไม่เกิน 20K ตาม Datasheet

สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากขา 3 จะเป็นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ และความถี่กลางจะมีค่าเปลี่ยนไปตามสัญญาณอินพุตที่เข้ามาที่ขา 5 จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตจะถูกส่งไปยังวงจร Driver เพื่อไป drive LED ต่อไป

3.) วงจร Driver

วงจร Driver จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง ซึ่งความเข้มแสงจะเปลี่ยนไปตามลักษณะของแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มาจากส่วนของวงจร PFM



รูปที่ 3.3 แสดงวงจร Driver

ในโครงการนี้ใช้ LED ของ Motorola เบอร์ MFOE76 ให้แสงสีแดงซึ่งสามารถมองเห็นได้ (ความยาวคลื่น 660 nm) ให้กระแสได้สูงถึง 60 mA และสามารถให้กำลังทางแสงได้ถึง 132 mW จากวงจร Driver เราใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 3904 ซึ่งสามารถทนกำลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นได้สูงถึง 310 mW ทำการต่อแบบไบแอสแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider-Bias) มีผลให้กระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเราทำการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ (VR_3) เพราะฉะนั้นเมื่อกระแสเบส (I_{B1}) เปลี่ยนทำให้กระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) เปลี่ยนไปด้วย ส่วนวงจรภาคสุดท้ายเราทำการต่อแบบ Common Collector เพราะว่าเราไม่คำนึงถึงอัตราการขยายแรงดัน แต่ต้องการอัตราขยายกระแส เพื่อที่จะไป Drive LED

ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาคนี้เลือกใช้เบอร์ 2N222N เพราะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) ได้สูงถึง 800 mA และความถี่สูงสุดที่สามารถตอบสนองได้ คือ 300 MHz กระแสเอมิเตอร์ (I_{E1}) เป็นตัวควบคุมกระแสเบส (I_{B2}) เพราะฉะนั้นเมื่อ (I_{E1}) เปลี่ยนมีผลทำให้ I_{B2} เปลี่ยนด้วย ซึ่ง I_{B2} จะทำให้ I_{E2} เปลี่ยน ดังนั้นกระแสที่ LED จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย

ตัวต้านทานปรับค่าได้ VR_4 ที่ต่อเข้ากับคาโธดของ LED ทำหน้าที่ไม่ให้กระแสไหลผ่าน LED มากเกินไป ซึ่งถ้ามีกระแสเอมิเตอร์ (I_{E2}) ไหลมาก LED อาจเกิดความเสียหายได้

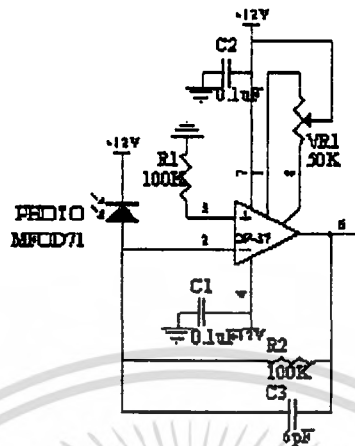
ตัวเก็บประจุ 47 μF (C_5) ทำหน้าที่คัปปลิงสัญญาณ PFM

ตัวเก็บประจุ 10 μF (C_6) ทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนที่มาจากไฟเลี้ยงลงสู่กราวด์

3.1.2 วงจรรับเสียง

1.) ภาคก่อนขยายแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ (Transimpedance)

ในโครงงานนี้ใช้ โฟโตไดโอด เบอร์ MFOD71 มีคุณสมบัติคือ เป็น Fast Pin Photodiodes ซึ่งสามารถตอบสนองได้เร็วคือน้อยกว่า 5 ns และมีกำลังงานสูง คือ 150 mw การออกแบบวงจรทางภาครับต้องคำนึงถึงระดับพลังงานต่ำสุดที่วงจรทางภาครับสามารถรับได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง รวมทั้งคุณสมบัติโฟโตไดโอดด้วย การทำงานของ โฟโตไดโอดจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับการทำงานของ LED คือที่ขั้วคาโธดของ โฟโตไดโอดจะต่อเข้ากับไฟเลี้ยง (Reverse Biase) และจะทำการเปลี่ยนสัญญาณความเข้มแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ขั้วแอนอดของโฟโตไดโอดจะต่อเข้ากับออปแอมป์ เบอร์ OP-37 มีคุณสมบัติเป็น Low Noise Precision High-Speed มีเกนแบนด์วิธ โปรดัคส์ 63 MHz มีค่า CMRR 114 dB ซึ่งทำการต่อวงจรแบบทรานส์อิมพีแดนซ์ หรือ วงจรแปลงกระแสเป็นศักย์ (Current-to-Voltage) ทำให้ภาคขยายต่อไปไม่ต้องดึงกระแสจากภาคก่อนขยายมากทำให้ลดสัญญาณรบกวนได้



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรการทำงานของออปแอมป์แบบ Current-to-Voltage

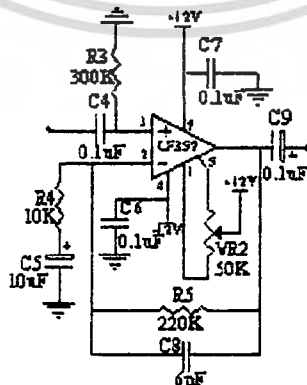
การทำงานของวงจร Current-to-Voltage จากรูปที่ 3.4 โฟโอดีไดโอดถูกต่อกลับขั้วแบบ Reverse Bias เมื่อแสงตกกระทบโฟโอดีไดโอด ความต้านทานภายในจะลดลง เป็นผลให้กระแสย้อนกลับ (I_F) เพิ่มขึ้นและทำให้โวลต์เดจเอาท์พุท (V_{out}) ซึ่งมีค่าเป็นลบมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

$$\text{อัตราขยายมีค่า } A_v = -R_F / R_m$$

$$V_{out} = R_F I_F$$

นั่นคือเมื่อตัวต้านทานอินพุท (R_m) ลดลง อัตราขยาย (A_v) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นโวลต์เดจเอาท์พุท จึงขึ้นกับกระแสย้อนกลับที่เกิดขึ้น นั่นคือถ้าแสงตกกระทบมาก กระแสย้อนกลับเพิ่มขึ้น ทำให้โวลต์เดจเอาท์พุทเพิ่มขึ้นด้วย

2.) วงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนแรกได้ออกมา ซึ่งจะมีค่าต่ำ เนื่องจากกระแสจากโฟโตรีโอด (I_p) มีค่าต่ำมาก จึงต้องทำการขยายโวลต์เดจเอาต์พุตนี้ให้มีค่ามากพอสำหรับวงจรภาคถัดไป (ส่วนคิมอดคูลेटที่ใช้หลักการเฟสล็อกคูลิป ซึ่งจะทำงานได้เมื่อค่าความถี่หรือโวลต์เดจที่เข้ามาทางขาอินพุตมีค่าสูงพอ)

การออกแบบวงจรขยายแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกใช้ออปแอมป์เบอร์ LF 357 ซึ่งเป็นออปแอมป์ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ช่วงแบนด์วิดท์กว้าง ๆ และย่านความถี่สูง

นอกจากนี้ตัวออปแอมป์ตัวนี้ยังมีคุณสมบัติ Low Noise, Low Drift Amplifiers และ High Gain ลักษณะของวงจรใช้การต่อวงจรแบบ Noninverting ให้มีอัตราขยายประมาณ 23 เท่า

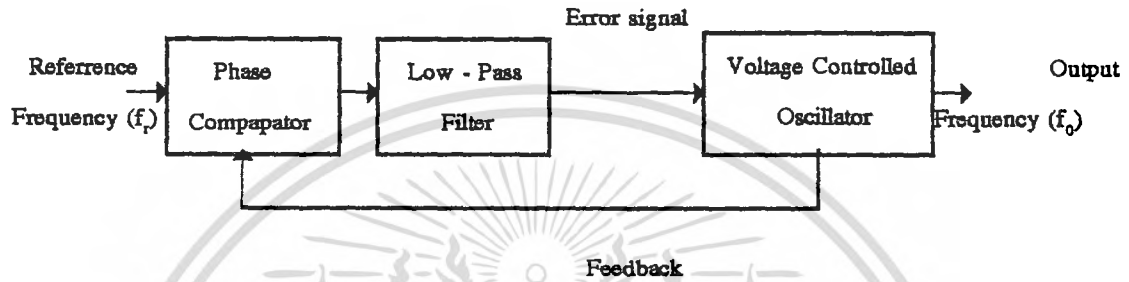
$$\begin{aligned} \text{คำนวณได้จาก } A_v &= (R_f/R_{in}) + 1 \\ &= (220k/10k) + 1 \\ &= 23 \end{aligned}$$

$$V_{out} = (R_f/R_{in}) V_{in}$$

วงจรภาคขยายส่วนที่สองใช้ไอซีเบอร์ LF357 2 ตัว ต่อแบบกลับเฟส (Inverting) เนื่องจากการต่อแบบนี้จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนต่ำกว่าแบบไม่กลับเฟส (Noninverting) เมื่อต่อที่อัตราขยายเท่ากัน เหตุผลที่ต้องต่อ LF 357 ในส่วนนี้ถึง 2 ตัว เพื่อทำการกลับเฟสให้ตรงกับสัญญาณอินพุต อัตราขยายรวมของวงจรส่วนนี้ใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ (R_f) เพื่อสามารถเลือกปรับอัตราขยายให้สูงสุด เหมาะสมทั้งในด้านสัญญาณรบกวนและการเป็นอินพุตของวงจรภาคถัดไป โดยในวงจรส่วนนี้สามารถเลือกปรับค่าอัตราขยายได้ตั้งแต่ 2 -22 เท่า

3.) วงจรคีมออคคูเลต

วงจรคีมออคคูเลตมีหน้าที่ทำให้สัญญาณที่ส่งเข้ามาจากวงจรขยายกลายเป็นสัญญาณอนาล็อก (เหมือนอินพุตเคม) ในส่วนนี้เลือกใช้ไอซี NE565 ซึ่งเป็นไอซีที่มีการทำงานแบบ



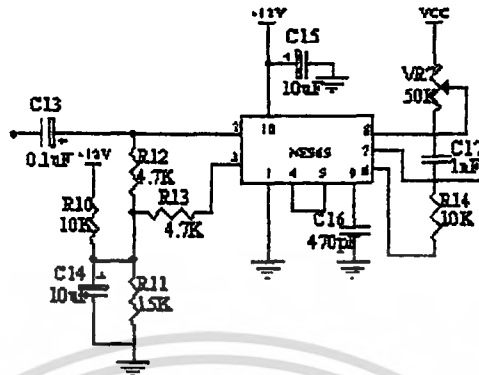
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการทำงานแบบเฟสล็อกคูลูป

เฟสล็อกคูลูป (Phase Lock Loop, PLL) ซึ่งภายในจะประกอบด้วย Phase Comparator , Low - Pass Filter (LPF) , Error Amplifier และ Voltage Controlled Oscillator (VCO) มีหลักการทำงานดังนี้

หลักการในการทำงานจะเริ่มจากส่วนเปรียบเทียบเฟสนำความถี่ (f_o) จากวงจรออสซิลเลเตอร์ภายในมาเปรียบเทียบกับความถี่อินพุต (f_r) ถ้าเกิดความแตกต่างทางเฟสของสัญญาณทั้งสอง เนื่องจากความถี่ไม่ตรงกัน จะเกิดแรงดันผิดพลาดออกมา แรงดันนี้จะผ่านวงจร LPF แล้วป้อนให้กับ VCO เพื่อทำการปรับความถี่ให้ตรงกัน เมื่อความถี่ (f_o) และความถี่อินพุต (f_r) ตรงกันแล้ว ความแตกต่างทางเฟสจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเรียกสภาวะนี้ว่าเกิดการ ล็อกความถี่ ถ้าความถี่จาก VCO ลดต่ำลงมา ทางเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบเฟส จะเกิดแรงดันเป็นบวกขึ้นแล้วผ่านวงจร LPF มาควบคุมให้ VCO เพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นจนเท่ากับความถี่ที่เข้ามาและทำนองเดียวกันถ้าความถี่ของ VCO สูงกว่าความถี่อ้างอิงที่เข้ามา แรงดันทางเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบเฟสจะลดต่ำลงเพื่อปรับความถี่ของ VCO จนเกิดการล็อกความถี่อีกครั้งหนึ่ง

วงจร LPF ของเฟสล็อกคูลูปนับเป็นส่วนที่สำคัญ เนื่องจากจะต้องทำแรงดันเอาต์พุตจากส่วนเปรียบเทียบเฟสให้เป็นแรงดันไฟตรงควบคุมที่ราบเรียบ เพื่อเวลาคงตัวของวงจรที่แน่นอนเพราะเฟสล็อกคูลูปจะไม่สามารถล็อกความถี่อินพุตเมื่อเกิดการล็อกความถี่ ทำให้

เราสามารถสร้างความถี่ที่บริสุทธิ์ได้จากความถี่อินพุตที่มีสัญญาณรบกวนปนอยู่ โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงวงจรดีมอดคูเลต

สัญญาณที่ได้จากวงจรมอดคูเลตจะถูกป้อนให้กับวงจรมอดคูเลตที่ขา 2 ของ NE 565 สามารถปรับเลือกความถี่กลาง (f_0) ได้โดยการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้ (V_{R7}) ให้ได้ความถี่เท่ากับความถี่กลางขึ้นอยู่กับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ (V_{R7}) และตัวเก็บประจุ (C_{16}) ดังสูตร

$$f_0 = 1 / (3.7 * V_{R7} * C_{16})$$

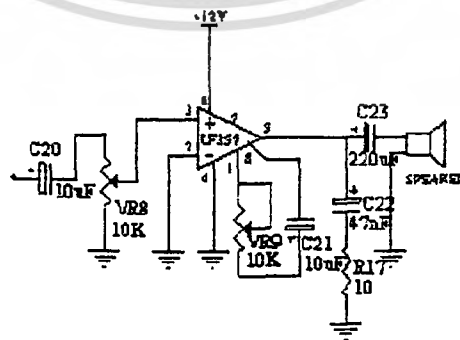
f_0 คือ ความถี่ของ VCO โดยไม่มีสัญญาณเข้ามา

C_{16} คือ ตัวเก็บประจุที่ต่อกับขา 9 และกราวด์

V_{R7} คือ ตัวต้านทานที่ต่อระหว่างขา 8 กับไฟเลี้ยง

กำหนดใช้ C_{16} มีค่า 470 pF จึงสามารถคำนวณ V_{R7} ได้ประมาณ 2k จึงเลือกใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ 50 k เพื่อการปรับเปลี่ยนค่าในช่วงที่กว้างครอบคลุมค่าที่คำนวณได้

4.) วงจรภาคขยายเสียง



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรขับลำโพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อทำการขยายสัญญาณอนาล็อกที่ได้จากวงจรคิมอดคูลต เพื่อนำไปขับลำโพง โดยเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ LM 386 ที่เป็น Power Amplifier ซึ่งวงจรที่เลือกใช้เป็นวงจรที่เหมาะสมกับงานที่ใช้แรงดันต่ำ ๆ และสามารถขับลำโพงได้โดยตรง มีอัตราขยายที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 20 -200 เท่า

สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรคิมอดคูลตจะเป็นสัญญาณอินพุตของ LM386 ที่ขา 3 โดยมีตัวต้านทานปรับค่าได้ 10 k เป็นตัวควบคุมสัญญาณอินพุต และมีขา 1 และ 8 เป็นขาที่ใช้ควบคุมอัตราขยาย

3.2 วงจรภาพ

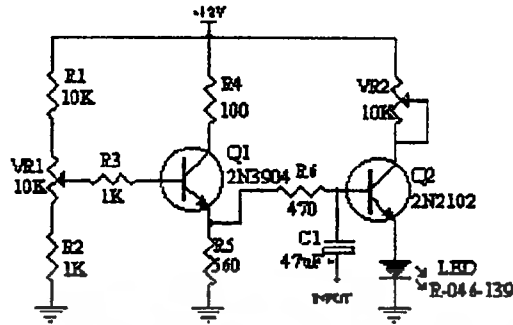
ในส่วนของวงจรภาพนั้นลักษณะการทำงานและวงจรที่ใช้ในโครงการมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าวงจรเสียงค่อนข้างมากเพราะประกอบด้วยวงจรส่งภาพ (Driver) และวงจรรับภาพ (Detector) ซึ่งเป็นการศึกษาขั้นพื้นฐานของการส่งภาพในระยะทางใกล้ ๆ

3.2.1 วงจรส่งภาพ

วงจรส่งภาพ แสดงดังรูปที่ 3.9 ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ทรานซิสเตอร์ภาคแรกใช้เบอร์ 2N 3904 ซึ่งเป็นเบอร์เดียวกันกับที่ใช้ในวงจร Driver ของภาคเสียง ทำหน้าที่เป็นด้วยกระดับ Off Set ทำการต่อวงจรแบบไปแอสแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider-Bias) ทำให้เมื่อปรับความต้านทานปรับค่าได้ กระแสเบส (I_{B2}) ซึ่งมีผลต่อกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E2}) ทำให้แสงที่ออกมาจาก LED เปลี่ยนแปลงไปด้วย สำหรับทรานซิสเตอร์ภาคหลังใช้เบอร์ 2N2102 จะทำการมอดคูลตสัญญาณภาพ (สัญญาณอินพุต) ที่เข้ามา แบบแอมพลิจูด ก็จะนำเอาสัญญาณอินพุตรวมกับสัญญาณพาหะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามการรวมกันของสัญญาณทำให้กระแสอิมิตเตอร์ (I_{E2}) ที่ไปขับ LED เปลี่ยนแปลงไป

VR_2 ที่ต่อเข้ากับขา Collector เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลผ่าน LED ไม่ให้มีค่ามากเกินไป

C_1 ที่ต่อระหว่างขา Base เป็นตัวลดการกระชากของสัญญาณเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์เกิดความเสียหาย

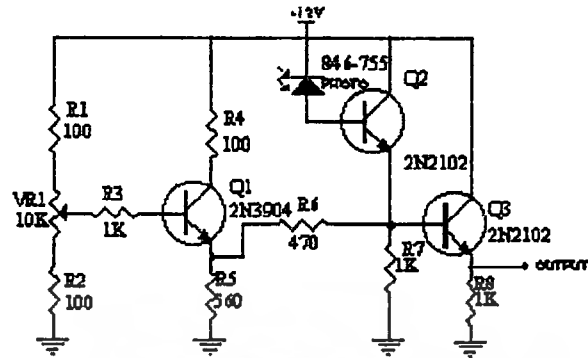


รูปที่ 3.9 แสดงวงจรส่งภาพ

3.2.2 วงจรรับภาพ

วงจรรับภาพ นี้ใช้ Photodiode เบอร์ 846-755 ซึ่งอยู่ในย่านอินฟราเรด สามารถทนกระแสได้สูงสุด 100 mA การต่อวงจร Detector ประกอบด้วยการต่อทรานซิสเตอร์ 2 แบบ คือ การต่อทรานซิสเตอร์แบบไบแอสแบ่งแรงดัน เพื่อยกระดับ Off Set โดยใช้เบอร์ 3904 และการต่อทรานซิสเตอร์แบบวงจรคาร์ลิงตัน โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 3904 และ 2N2102 ขณะยังไม่มีการตรวจจับโฟโต้ไดโอดซึ่งต่อไว้แบบ Reverse Bias ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2102 จะทำงานก็ต่อเมื่อมีกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) มา Trig ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ (Q_2) ซึ่งกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) จะต้องมีค่ามากพอถึงค่า ๆ หนึ่ง จึงจะสามารถไบแอสให้ทรานซิสเตอร์ (Q_2) ทำงานได้ โดยที่กระแสอิมิตเตอร์ (I_{E3}) จะเปลี่ยนแปลงตามกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) ซึ่งกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) สามารถปรับเปลี่ยนได้โดย VR₁ เมื่อมีแสงมาตกกระทบบโฟโต้ไดโอด ความต้านทานภายในโฟโต้ไดโอดจะลดลง ทำให้กระแสเบส (I_{B2}) ไหล เมื่อแสงตกกระทบบมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสเบส (I_{B2}) ค่า ๆ หนึ่งจะไปแอสให้ทรานซิสเตอร์ (Q_2) ทำงานทำให้เกิดการไหลของกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E2}) ซึ่งจะเพิ่มกระแสเบส (I_{B3}) ให้มากขึ้นทำให้อัตราขยายสัญญาณเพิ่มขึ้น ดังนั้น (I_{E3}) จึงเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของโวลต์เดจที่ตกคร่อม ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E2}) ซึ่ง (I_{E2}) ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่มากกระทบบโฟโต้ไดโอด

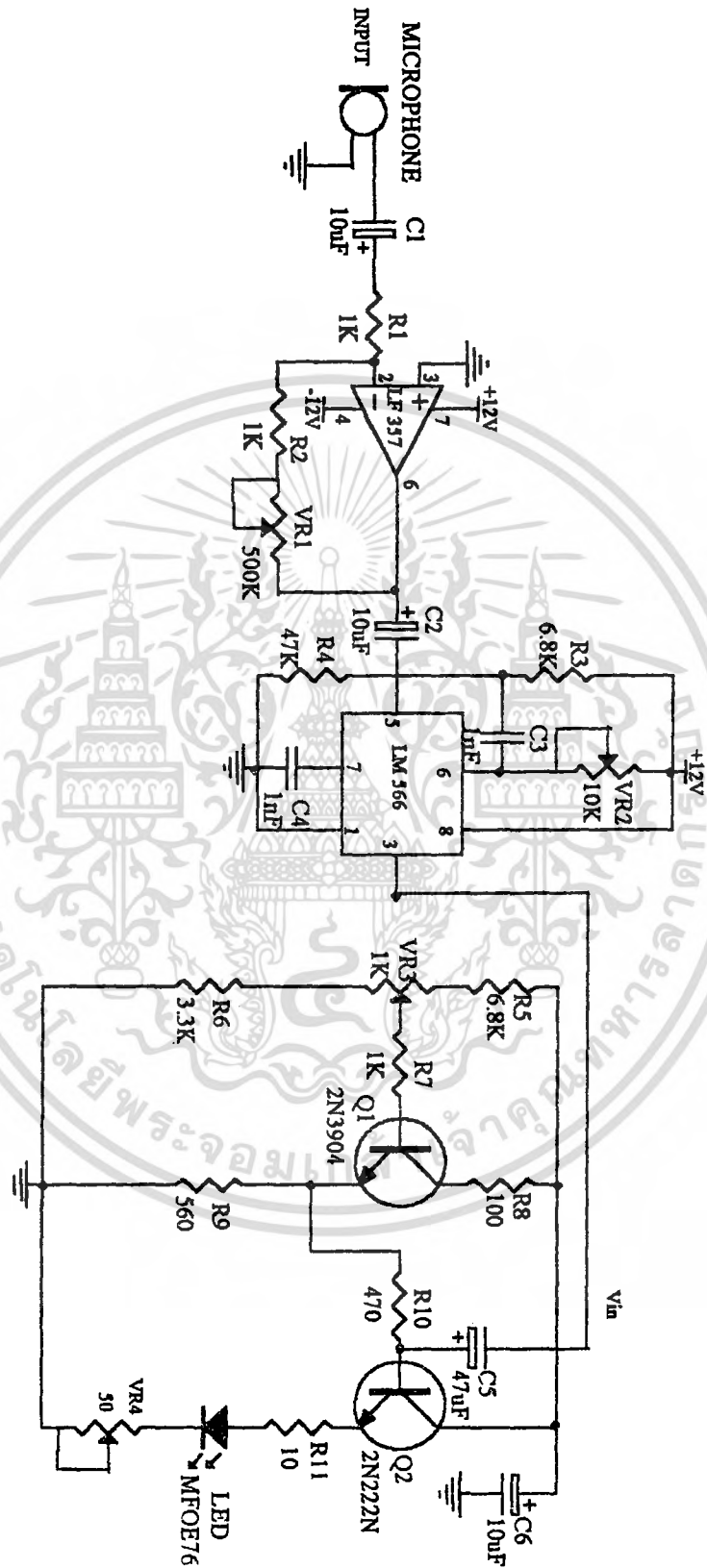
หมายเหตุ กระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) จะปรับเปลี่ยนไว้ที่ค่าเหมาะสมค่าหนึ่งเพื่อให้ได้สัญญาณเอาท์พุท (สัญญาณภาพ) ที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.10 แสดงวงจรรับภาพ

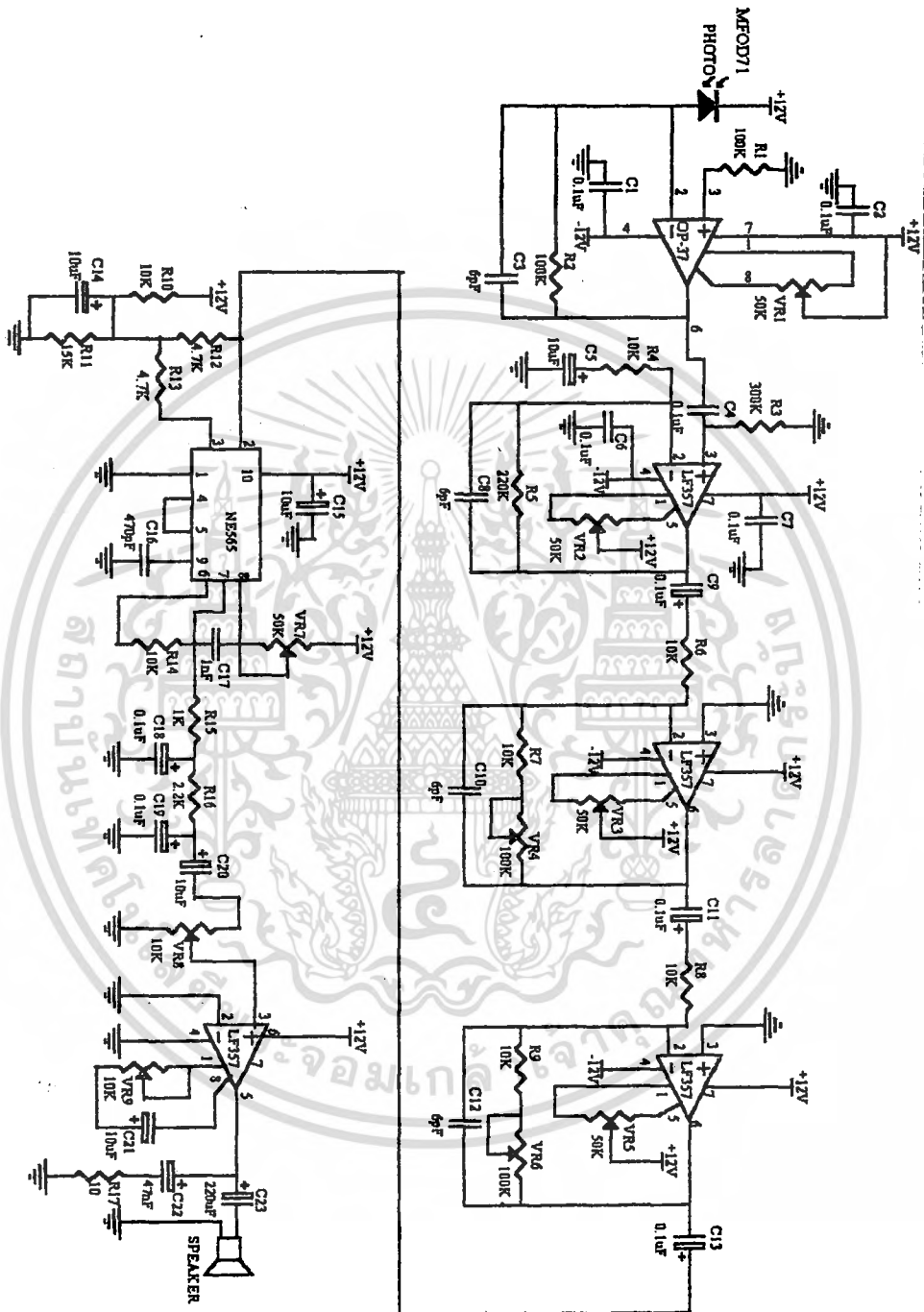
* วงจร Driver ในโครงงานนี้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานกับ Laser Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงวงจรภาคส่งเสียงที่ใช้ในงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงวงจรภาครับเสียงที่ใช้งานในโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบวงจรทั้งหมด มีลักษณะดังนี้

4.1.1 วงจรทางเสียง

1.) ผลการทดลองการทำงานของวงจรทางภาคส่งเสียง

จากการทดลอง โดยขณะยังไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุตจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ LED ถูกไบแอสให้ทำงานด้วยกระแสอิมิตเตอร์ (I_{E1}) ที่ตั้งไว้ที่ 10 mA พบว่าขาอินพุตมีสัญญาณรบกวนจากไฟเลี้ยงประมาณ 10 mV

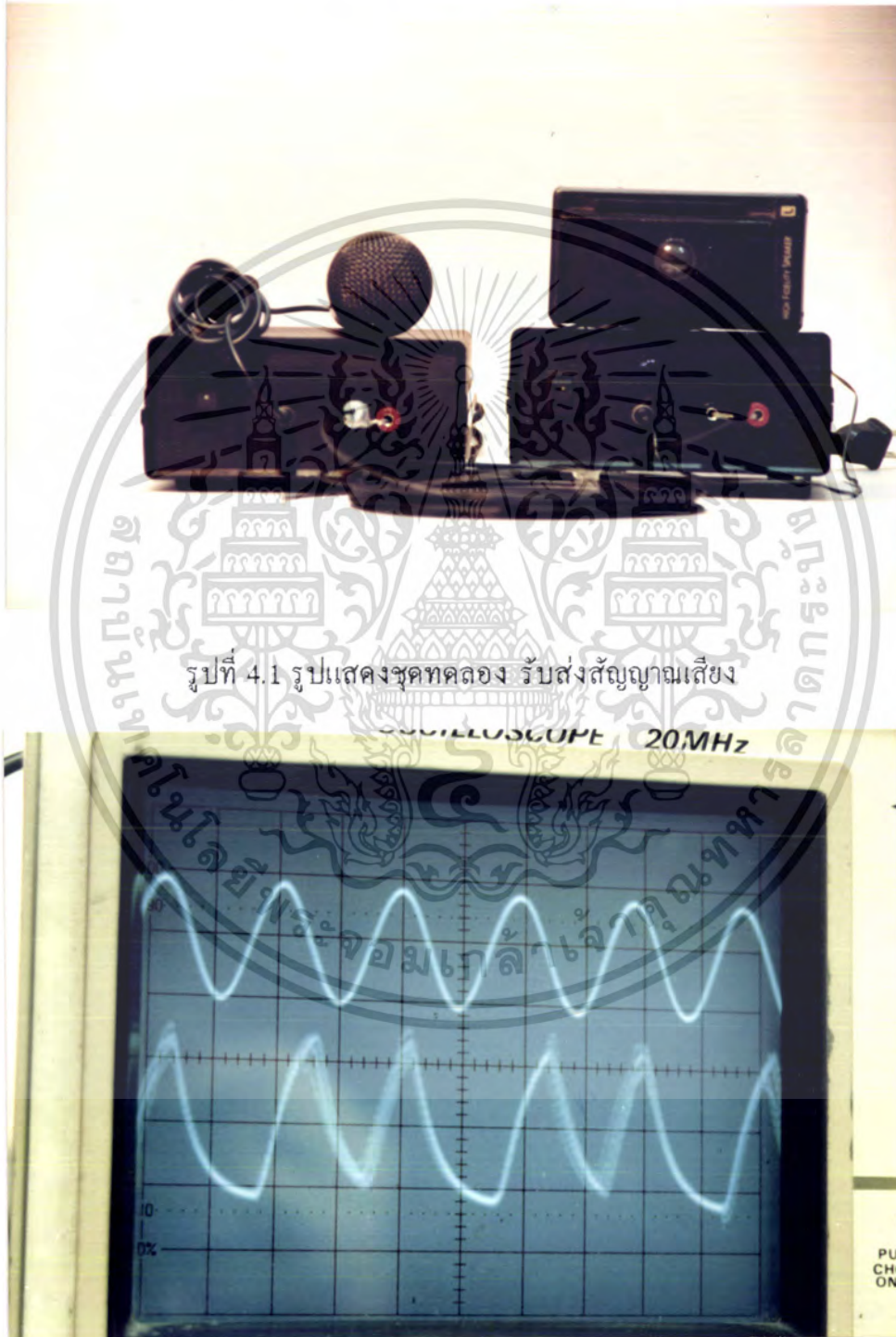
เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์รูปซายน์ความถี่ต่าง ๆ (มีค่ามากกว่า 16 Hz ซึ่งเป็นความถี่คัทออฟและไม่เกิน 20 KHz) ตั้งค่าแอมพลิจูดสูงสุดไว้ที่ 50 mV เมื่อสัญญาณผ่านเข้าไปในวงจรขยาย LF357 สัญญาณถูกขยายประมาณ 128 เท่า โดยยังไม่อิ่มตัว (Saturate) ถ้าอัตราขยายมากกว่านี้สัญญาณจะถูกขลิบ สัญญาณที่ถูกขยายจะผ่านไปที่วงจรมอดคูเลตที่ใช้ LM566 ตั้งค่าความถี่กลาง ไว้ที่ 300 kHz นำสัญญาณมอดคูเลต เข้าไปขับ LED กระแสจะเปลี่ยนแปลงไปจากค่ากระแส 10 mA และความเข้มแสงที่เปล่งออกจาก LED เปลี่ยนแปลงไป

* ค่ากระแสอิมิตเตอร์ (I_{E2}) มีการเปลี่ยนแปลงเร็วมากและมีค่าน้อยมากจึงไม่สามารถตรวจวัดค่าได้แน่นอน

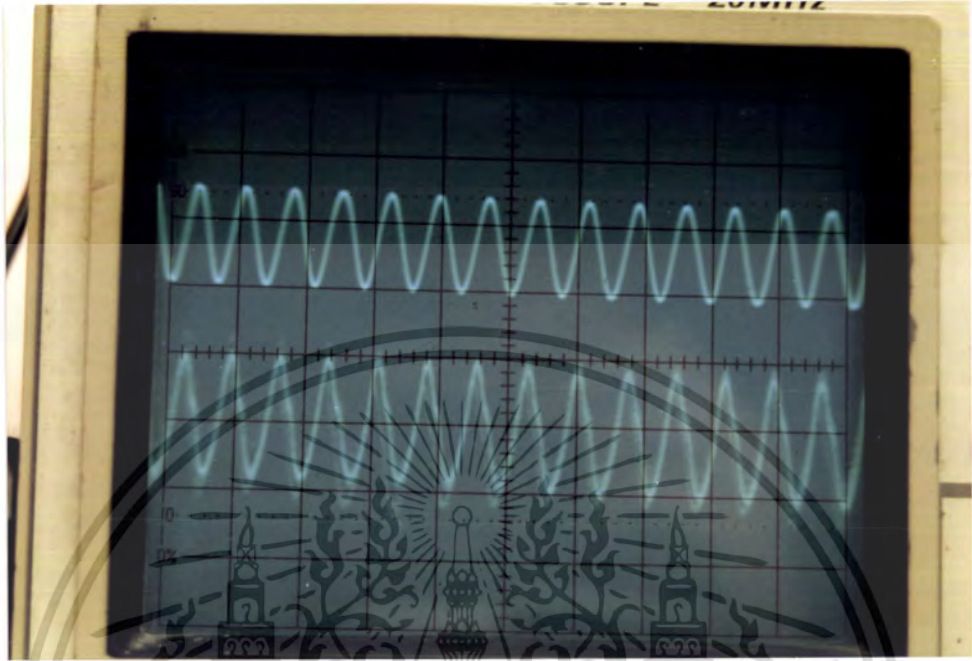
2.) ผลการทดลองการทำงานของวงจรภาครับเสียง

จากการทดลองพบว่า เมื่อโฟโตไดโอดได้รับสัญญาณแสงจากเส้นใยนำแสงจะเกิดกระแสไหลเข้าสู่ขา 2 ของ OP-37 มีค่าน้อยมาก มีค่าโวลต์เตจอยู่ในหน่วยของมิลลิโวลต์ เมื่อป้อนสัญญาณเข้าสู่ภาคขยาย สัญญาณจะถูกขยายตามอัตราขยายที่ตั้งไว้ สัญญาณที่ออกจากวงจรมอดคูเลตจะมีลักษณะเฟสเหมือนเดิม เมื่อสัญญาณผ่านเข้าสู่วงจรมอดคูเลต พบว่า ที่ขา 7 มีสัญญาณเอาต์พุตแสดงออกมา สัญญาณที่ถูกคีมอดคูเลตแล้วมีลักษณะคล้ายสัญญาณที่ใส่เข้าไปในวงจรส่งเสียง คือ มีลักษณะคล้ายสัญญาณรูปซายน์แต่มีค่าโวลต์เตจลดลงมาก ประมาณ 2/3 ของสัญญาณอินพุต ความถี่มีค่าลดลง

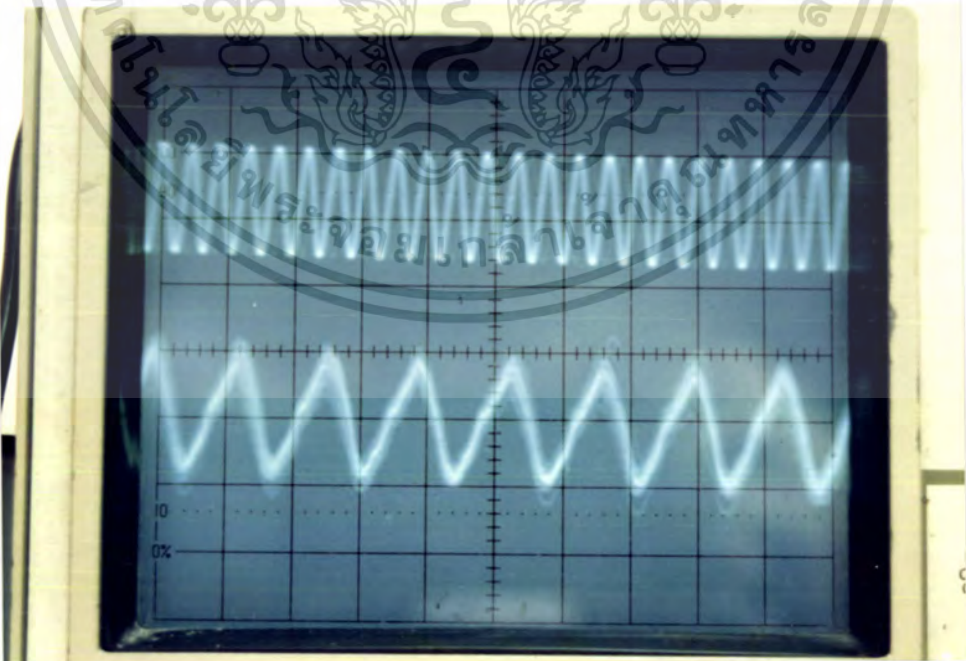
เมื่อนำสัญญาณไปขับลำโพง เสียงที่ออกจากลำโพงแปรตามความถี่อินพุต คือที่ความถี่ต่ำลำโพงให้เสียงทุ้มต่ำ และที่ความถี่สูงลำโพงให้เสียงแหลมสูง



รูปที่ 4.2 รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ที่ได้จากการป้อนสัญญาณอินพุตรูปไซน์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 250 Hz มีแอมพลิจูด 50 mV ที่เกาต์พุตคือช่องรับส่งสัญญาณเสียงจะโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ที่ได้จากการป้อนสัญญาณอินพุตรูปไซน์
ความถี่ 10 kHz แอมพลิจูด 50 mV แก่ชุดทดลองรับส่งสัญญาณเสียง



รูปที่ 4.4 รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ที่ได้จากการป้อนสัญญาณอินพุตรูปไซน์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้ในการค้า
ความถี่ 19 kHz แอมพลิจูด 50 mV แก่ชุดทดลองรับส่งสัญญาณเสียง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) ผลการทดลองหาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio)

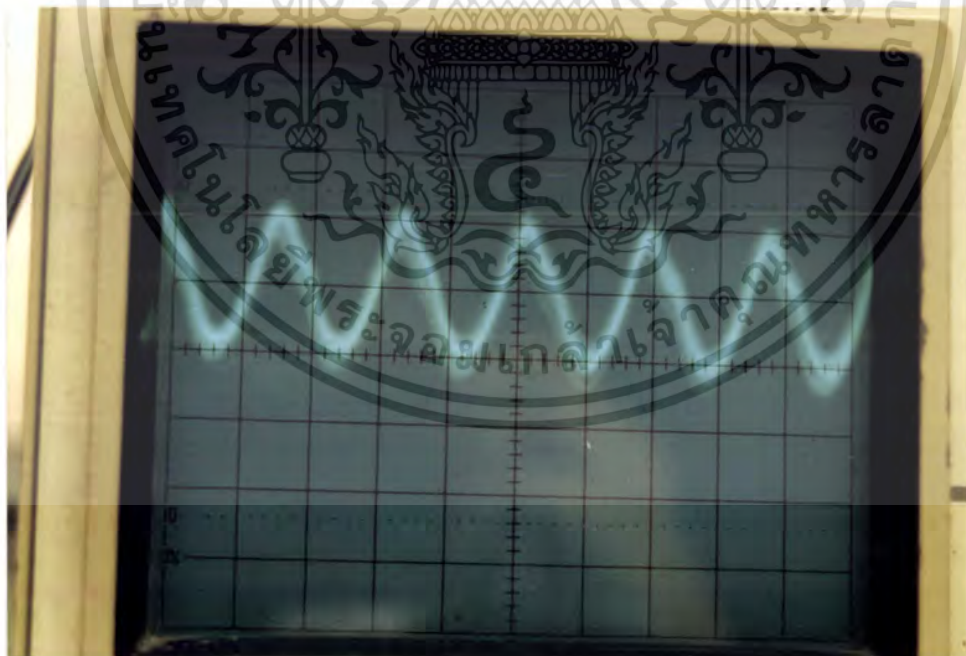
จากการหาอัตราส่วนต่อสัญญาณรบกวน เพื่อตรวจสอบคุณภาพของวงจรเสียงได้ค่า ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{signal / noise} &= 20 \log (V_s / V_n) \\ &= 20 \log (0.25 \text{ V} / 35 \text{ mV}) \\ &= 23.098 \text{ dB} \end{aligned}$$

เมื่อ V_s คือ ค่าโวลต์เดจเอาท์พุทของสัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้ หลังจากทำการเปิดเครื่องส่ง

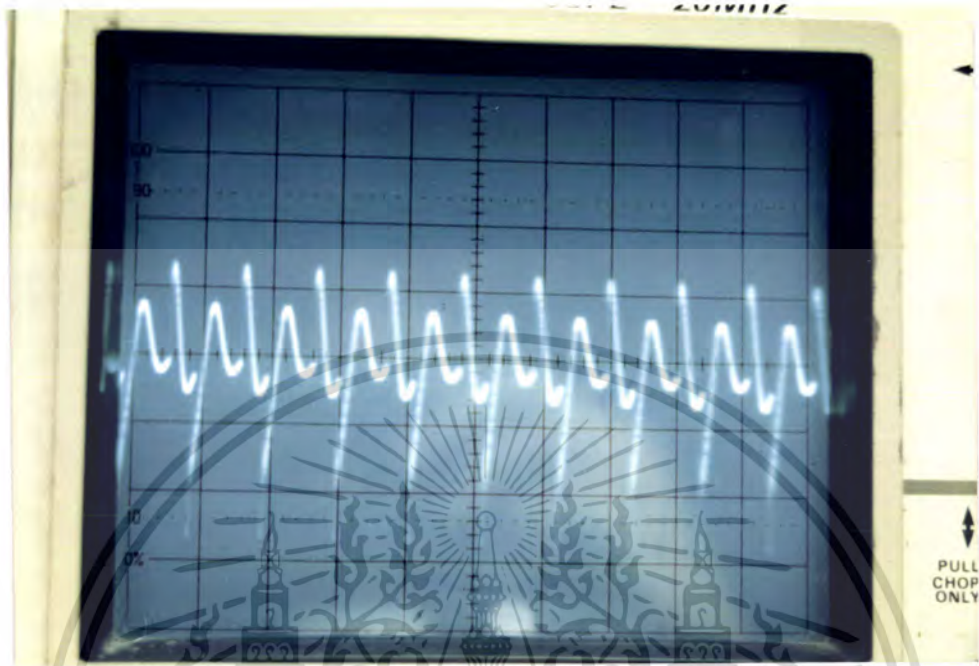
V_n คือ ค่าโวลต์เดจเอาท์พุทของสัญญาณรบกวนที่ได้รับได้ หลังการทำการปิดเครื่องส่ง

ค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าไม่สูง เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมาก



รูปที่ 4.5 รูปแสดงสัญญาณเอาท์พุทของสัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้ หลังจากทำการเปิดเครื่องส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปแสดงสัญญาณเอาต์พุทของสัญญาณรบกวนที่รับได้ หลังจากทำการปิดเครื่องส่ง

4.1.2 วงจรทางภาพ

1.) ผลการทดลองการทำงานของวงจรภาคส่งภาพ

ในขณะนี้ยังไม่มี การใช้กล้อง CCD ส่งสัญญาณภาพเป็นสัญญาณอินพุทของวงจร ปรับตั้งค่ากระแสไบแอส LED ไว้ประมาณ 60 mA

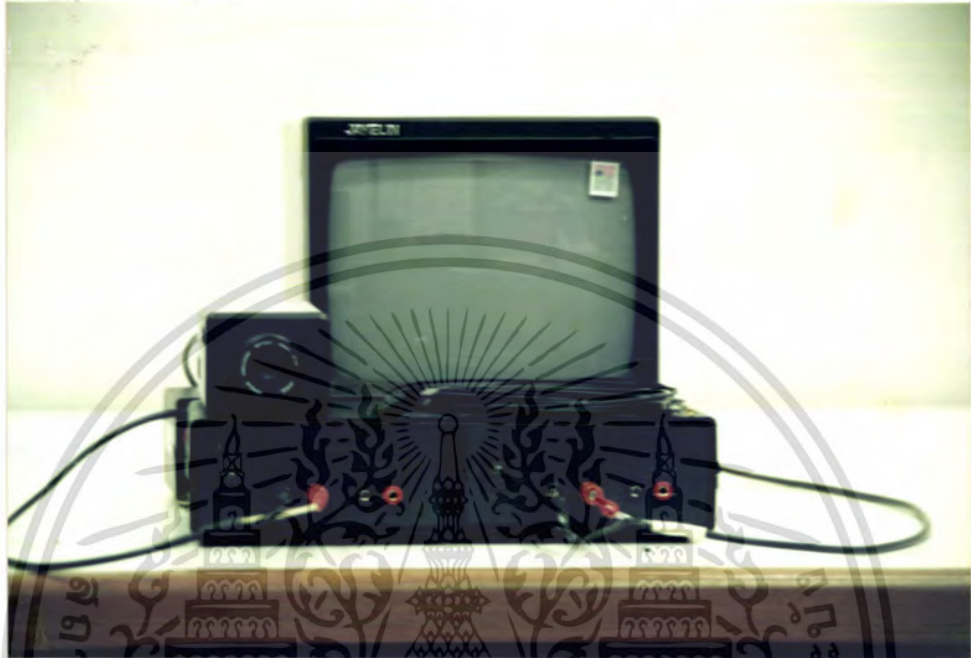
เมื่อส่งสัญญาณภาพเข้าสู่วงจร พบว่าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ (Q_2) สัญญาณถูกยกระดับขึ้นจากเดิมและเมื่อตรวจจับสัญญาณที่ขาอีมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (Q_2) พบว่าสัญญาณถูกขยาย โดยยังถูกยกระดับอยู่ที่ระดับเดิม เมื่อวัดค่ากระแสที่ผ่าน LED พบว่ากระแสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากอย่างรวดเร็ว ใช้กล้องอินฟราเรดส่องดู พบว่า LED มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอย่างรวดเร็ว

2.) ผลการทดลองการทำงานของวงจรภาครับภาพ

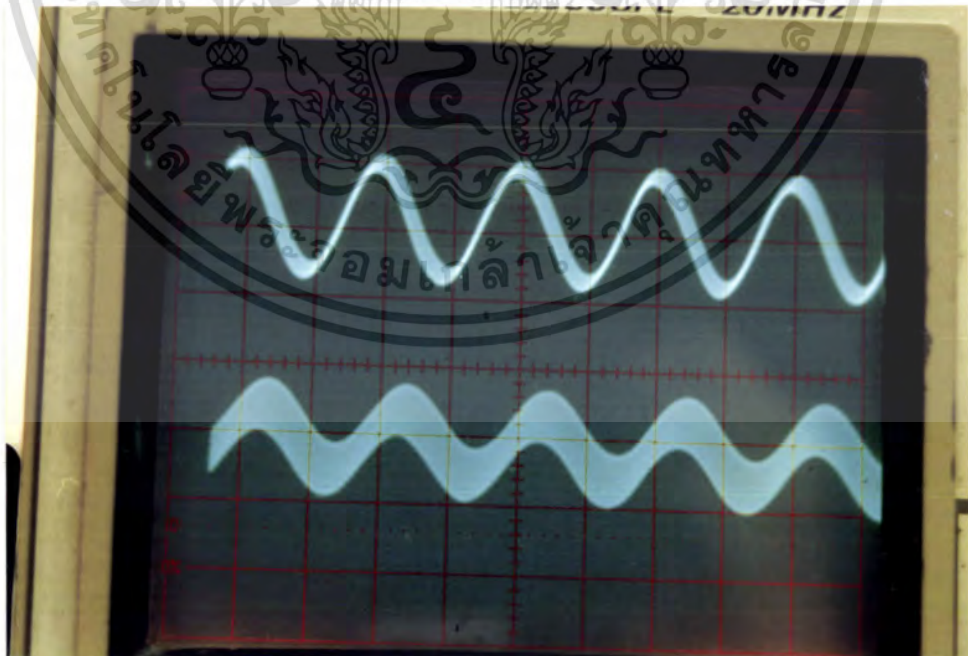
เมื่อส่งสัญญาณแสงนี้เข้าสู่เส้นใยนำแสงและนำโฟโตรีซิสเตอร์ของวงจรภาครับภาพมารับแสงจากเส้นใยนำแสง

พบว่ามีการแสไหลเข้าสู่จอร์ดังตันของทรานซิสเตอร์ 2N2102 ในปริมาณที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
น้อยมากจะ จากการจับสัญญาณที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ (Q_2) พบว่ามีสัญญาณสวิงอยู่ที่ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับแรงดันค่าหนึ่ง และเมื่อตรวจจับที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_3 พบว่าสัญญาณถูกขยาย เมื่อนำสัญญาณนี้เข้าสู่จอมอนิเตอร์ จะได้ภาพแสดงออกมา



รูปที่ 4.7 รูปแสดงชุดทดลองรับส่งสัญญาณภาพ



รูปที่ 4.8 รูปแสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของชุดทดลองรับส่งสัญญาณภาพ เมื่อป้อน

สัญญาณอินพุตรูปไซน์ ความถี่ 2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ *ไม่สามารถใช้สัญญาณภาพที่แท้จริงได้ เนื่องจากมีปัญหาเรื่องการถ่ายภาพ



รูปที่ 4.9 รูปแสดง ภาพตัวอย่างบนจอมอนิเตอร์ ที่ได้จากกล้องวิดีโอโดยตรง



รูปที่ 4.10 รูปแสดง ภาพตัวอย่างบนจอมอนิเตอร์ ที่ได้จากการส่งสัญญาณวิดีโอผ่าน
ชุดทดลองรับส่งสัญญาณภาพ

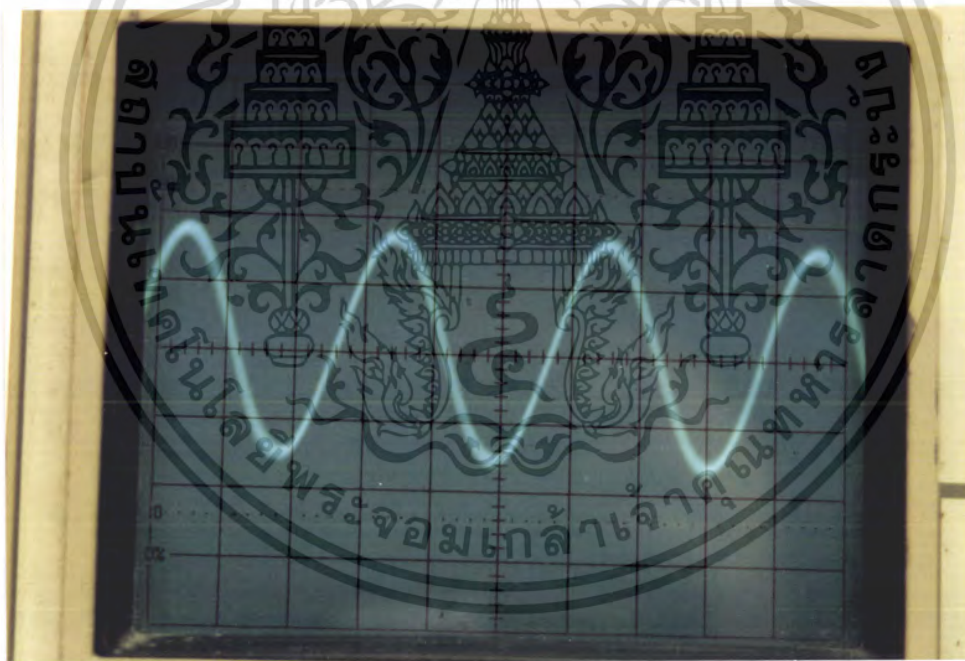
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) ผลการทดลองหาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio)

จากการหาอัตราส่วนของสัญญาณรบกวน เพื่อตรวจสอบคุณภาพของวงจรภาพได้ค่า ดังนี้

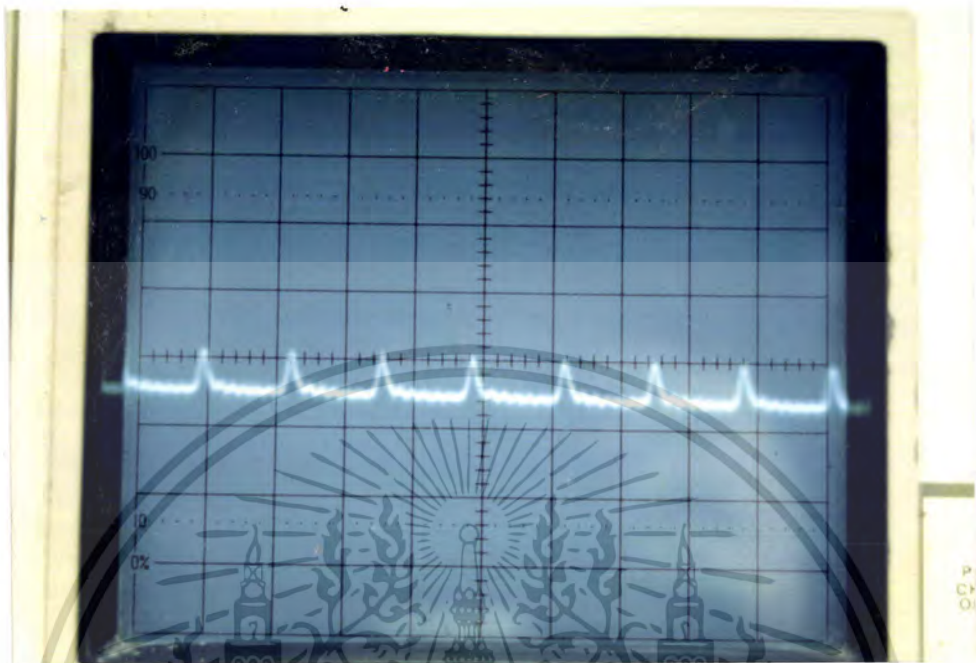
$$\begin{aligned} \text{signal / noise} &= 20 \log (V_s / V_n) \\ &= 20 \log (3 \text{ V} / 1\text{V}) \\ &= 9.54 \text{ dB} \end{aligned}$$

ค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมาก



รูปที่ 4.11 รูปแสดง สัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณภาพที่ได้รับได้ หลังจากทำการเปิดเครื่องส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปแสดง สัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณรบกวนที่รับได้ หลังจากทำการปิด เครื่องส่ง

4.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบ การทำงานของวงจรรับส่งสัญญาณเสียง พบว่าวงจรรับส่งสัญญาณเสียง สามารถทำงานได้ดีพอควรแต่ยังถือว่าไม่น่าพอใจนัก เพราะอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ นั่นแสดงว่ามีสัญญาณรบกวนสูงหรือมีเสียงรบกวนอยู่มาก จึงต้องมีการแก้ไขปรับปรุงวงจร อีกหลายจุด โดยเฉพาะเรื่องสัญญาณรบกวนภายในวงจร

ผลการทดสอบ การทำงานของวงจรทางภาพ พบว่าสัญญาณภาพที่ได้มีคุณภาพต่ำ คือ มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำ จึงทำให้สัญญาณภาพที่ได้รับมีความคมชัดต่ำ และมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณสูง จึงควรต้องทำการปรับปรุงวงจร โดยเฉพาะการเลือกใช้ อุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ชุดสื่อสารทางเคเบิลด้วยเส้นใยนำแสงในโครงการนี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารสัญญาณภาพและสัญญาณเสียงโดยใช้เส้นใยนำแสงเป็นช่องการสื่อสาร โดยการทำงานของวงจรภาพและเสียงทำงานเป็นอิสระต่อกัน

5.1.1 วงจรเสียง แบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือ

1.) วงจรภาคส่ง

ทำการแปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยไมโครโฟน ขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายด้วยออปแอมป์ แล้วมอดูเลตแบบความถี่ หลังจากนั้นแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงด้วย LED เพื่อป้อนเข้าสู่เส้นใยนำแสงส่งเข้าไปที่ภาครับ

2.) วงจรภาครับ

แสงจากเส้นใยนำแสงตกกระทบโฟโตไดโอด โฟโตไดโอดแปลงสัญญาณแสงเป็นกระแส จากนั้นทำการแปลงกระแสเป็นโวลต์เตจ โดยวิธีการต่อวงจรแบบ Current-to-Voltage นำ Voltage ที่ได้ไปขยายสัญญาณจนเหมาะสมที่จะทำการคีมอดูเลตด้วยวิธีเฟสล็อกแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายเพื่อที่จะไปขับลำโพงให้แสดงสัญญาณเสียงออกมา

5.1.2 วงจรภาพ แบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือ

1.) วงจรภาคส่ง

สัญญาณข้อมูลภาพที่ส่งเข้าไปในวงจรจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแสงเพื่อป้อนเข้าสู่เส้นใยนำแสง โดยวิธีการมอดูเลตแบบแอมพลิจูดนั่นคือความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจาก LED จะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณภาพที่ถูกมอดูเลต

2.) วงจรภาครับ

วงจรภาครับทำหน้าที่ เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณภาพขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอด หลังจากนั้นจึงทำการคีมอดูเลตให้ได้สัญญาณภาพออกมาเหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบการทำงานของวงจรที่สร้างขึ้น พบจุดที่ควรแก้ไขหลายอย่าง โดยแบ่งพิจารณาได้ดังนี้

1.) ไมโครโฟนที่ใช้ในวงจรมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณเสียงค่อนข้างต่ำ จึงควรเลือกใช้ไมโครโฟนที่มีคุณสมบัติดีกว่านี้ เช่น ไมโครโฟนชนิดคอนเดนเซอร์ ซึ่งอาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนจากไฟเลี้ยงที่ใช้ไบแอส แต่สามารถลดปัญหานี้ได้ด้วยการเลือกใช้ Power Supply ที่มีคุณภาพสูง

2.) LED และ ไฟโต้ไดโอด ควรเลือกใช้ชนิดที่มีกำลังสูง ๆ เช่น เลเซอร์ไดโอด เพื่อเพิ่มระยะทางการสื่อสาร และเลือกใช้คอนเนคเตอร์ที่เหมาะสมและใช้งานได้ง่าย เพื่อให้กำลังงานของแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสงได้มาก เป็นการลดการสูญเสียของสัญญาณ

3.) เส้นใยนำแสงที่ควรใช้เป็นชนิด Single mode เพื่อลดการสูญเสียของสัญญาณภายในเส้นใยนำแสงซึ่งถ้าใช้เส้นใยนำแสงชนิดนี้จำเป็นจะต้องเลือกใช้ อุปกรณ์แปลงแสงที่มีคุณภาพสูงซึ่งก็คือ เลเซอร์ไดโอด

4.) วงจรขยายในส่วนภาครับสัญญาณเสียง อาจมีการปรับปรุงให้มีการทำงานที่มีคุณภาพมากขึ้น เพื่อลดสัญญาณรบกวนภายในวงจร

5.) ลำโพงที่เลือกใช้ ควรเลือกใช้ชนิดที่มีกำลังสูง เพื่อสัญญาณเสียงที่ดีขึ้น

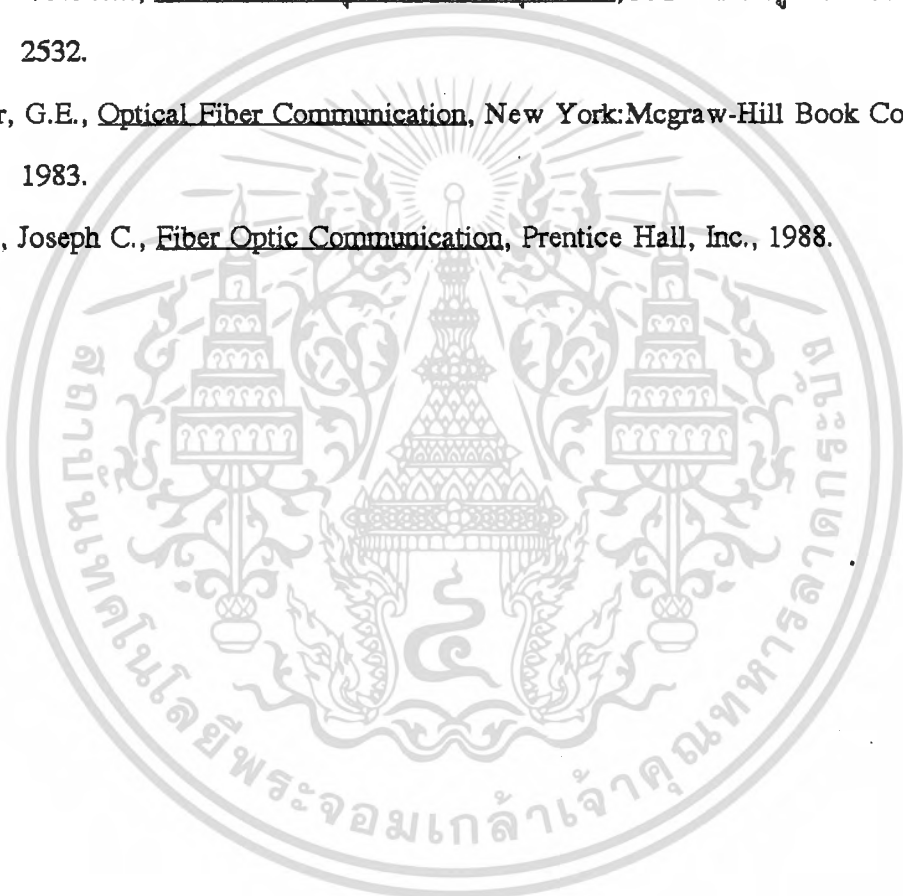
6.) ในส่วนวงจรคิมอดคูลเตคของสัญญาณเสียง อาจเพิ่มวงจร Band Pass Filter เพื่อกรองเอาเฉพาะย่านความถี่ที่ต้องการ และลดสัญญาณรบกวนภายในวงจร

7.) ถ้าต้องการส่งสัญญาณข้อมูลไปได้ในระยะทางที่ไกลมากขึ้น ควรเปลี่ยนการทำงานเป็นการสื่อสารแบบดิจิทัลแทน เพราะมีสัญญาณรบกวนและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำกว่ามาก

8.) ควรทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณข้อมูลภาพและเสียง ให้สามารถส่งผ่านสัญญาณโดยใช้เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว เพื่อความสะดวกในการใช้งานและความประหยัด

เอกสารอ้างอิง

1. อภินันท์ มัชฌานนท์, การสื่อสารเส้นใยนำแสง, พิมพ์ครั้งที่ 5, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
2. ชัยวัฒน์ ลิมพรจิตรวิไล, คู่มืออิเล็กทรอนิกส์, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2538.
3. ประกิจ ตั้งศิษานนท์, วิศวกรรมการสื่อสาร, พิมพ์ครั้งที่ 4, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539.
4. สุชาติ กังวารจิตต์, เครื่องรับส่งวิทยุและระบบวิทยุสื่อสาร, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2532.
5. Keiser, G.E., Optical Fiber Communication, New York:Mcgraw-Hill Book Company, 1983.
6. Palais, Joseph C., Fiber Optic Communication, Prentice Hall, Inc., 1988.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

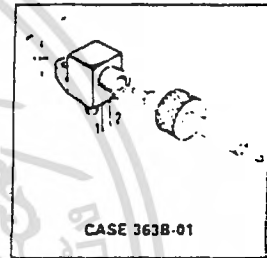
Fiber Optics — FLCS Family Visible Red LED

This device is designed for low cost, medium frequency, fiber optic systems using 1000 micron core plastic fiber. It is compatible with Motorola's wide variety of detector functions from the MFOD70 series. The MFOE76 employs gallium aluminum technology, and comes pre-assembled into the convenient and popular FLCS connector.

- Low Cost
- Very Simple Fiber Termination and Connection See Figure 9
- Convenient Printed Circuit Mounting
- Integral Molded Lens for Efficient Coupling
- Mates with 1000 Micron Core Plastic Fiber, such as Eska SH4001

MFOE76

FLCS FAMILY
FIBER OPTICS
VISIBLE RED
LED
660 nm



MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	V_R	5	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
Forward Current — Peak Pulse	I_{FP}	1	A
Total Power Dissipation: $T_A = 25^\circ\text{C}$ (1) Derate above 35°C	P_D	132 2	mW mW/°C
Ambient Operating Temperature Range	T_A	40 to +100	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 to +100	°C
Lead Soldering Temperature (2)	—	260	°C

Notes: 1. Measured with device soldered into a typical printed circuit board.
2. 5 seconds max. 1/16 inch from case.

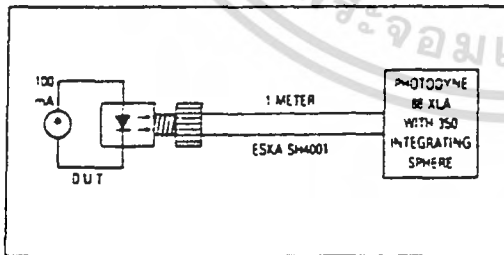


Figure 1. Power Launched Test Setup

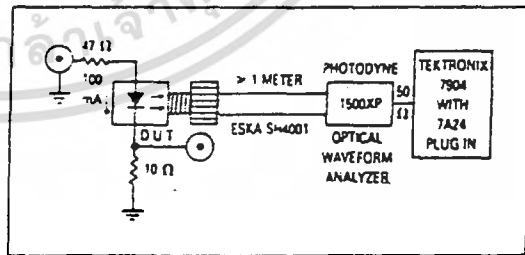


Figure 2. Optical Turn-On and Turn-Off Test Setup

MFOE76

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Reverse Leakage Current ($V_R = 3\text{ V}$)	I_R	—	100	—	nA
Reverse Leakage Current ($V_R = 5\text{ V}$)	I_R	—	10	100	μA
Forward Voltage ($I_F = 60\text{ mA}$)	V_F	—	1.8	2.2	V
Temperature Coefficient of Forward Voltage	ΔV_F	—	-2.2	—	mV/K
Capacitance ($f = 1\text{ MHz}$)	C	—	50	—	pF

OPTICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Peak Wavelength ($I_F = 60\text{ mA}$)	λ_P	—	660	—	nm
Instantaneous Power Launched ($I_F = 100\text{ mA}$, Figure 1)	P_L	200	540	—	μW
Optical Turn-On Time (Figure 2)	t_{on}	—	200	—	ns
Optical Turn-Off Time (Figure 2)	t_{off}	—	150	—	ns
Half-Power Electrical Bandwidth (1)	BWe	—	6	—	MHz

(1) $I_F = 100\text{ mA}$ pt-pt, 100% modulation

TYPICAL CHARACTERISTICS

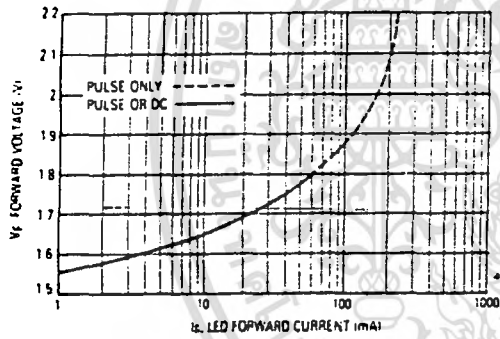


Figure 3. Forward Voltage versus Forward Current

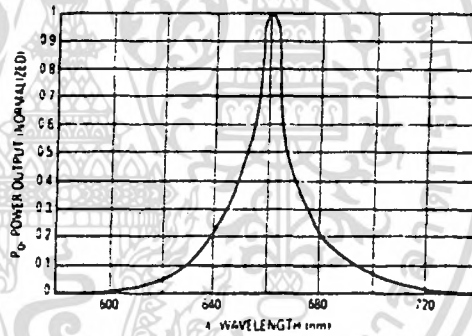


Figure 4. Relative Spectral Output

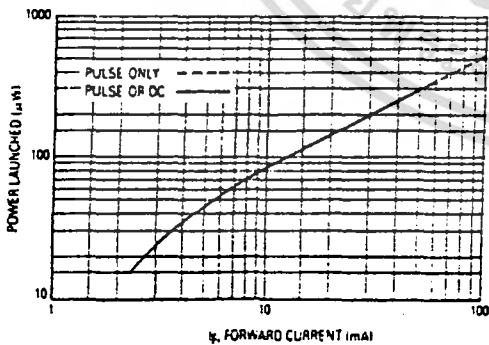


Figure 5. Power Launched versus LED Forward Current

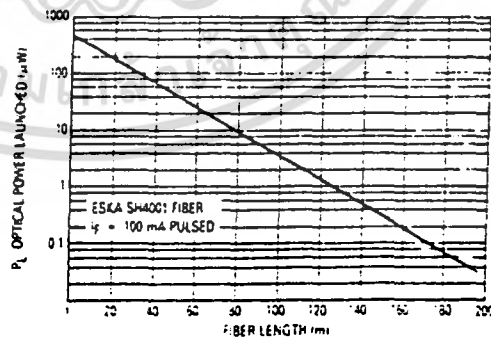


Figure 6. Power Launched versus Fiber Length



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fiber Optics — FLCS Family
Photo Detector
Diode Output

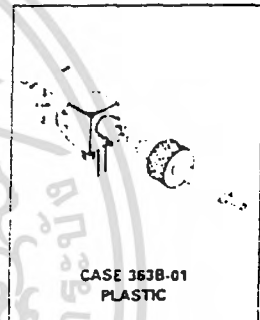
MFOD71

FLCS FAMILY
FIBER OPTICS
PHOTO DETECTOR
DIODE OUTPUT

... designed for low cost, short distance Fiber Optic Systems using 1000 micron core plastic fiber.

Typical applications include: high isolation interconnects, disposable medical electronics, consumer products, and microprocessor controlled systems such as coin operated machines, copy machines, electronic games, industrial clothes dryers, etc.

- Fast PIN Photodiode. Response Time < 5 ns
- Ideally Matched to MFOE76 Emitter for Plastic Fiber Systems
- Annular Passivated Structure for Stability and Reliability
- FLCS Package
 - Includes Connector
 - Simple fiber Termination and Connection (Figure 4)
 - Fast, Board Mounting
 - Molded Lens for Efficient Coupling
 - Mates with 1000 Micron Core Plastic Fiber (Eska SH4001)



MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	MFOD71 V_R	100	Volts
Total Power Dissipation in $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	150 2	mW mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-40 to +100	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Dark Current ($V_R = 20\text{ V}, R_L = 1\text{ M}\Omega, T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 85^\circ\text{C}$)	I_D	—	0.05 10	10 —	nA
Reverse Breakdown Voltage ($I_R = 10\ \mu\text{A}$)	$V_{(BR)R}$	50	100	—	Volts
Forward Voltage ($I_F = 50\text{ mA}$)	V_F	—	—	1.1	Volts
Series Resistance ($I_F = 50\text{ mA}$)	R_s	—	8	—	Ohms
Total Capacitance ($V_R = 20\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$)	C_T	—	3	—	pF

OPTICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Responsivity ($V_R = 5\text{ V}$, Figure 2)	R	0.15	0.2	—	$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Response Time ($V_R = 5\text{ V}, R_L = 50\ \Omega$)	t_{resp}	—	5	—	ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MFOD71

TYPICAL COUPLED CHARACTERISTICS

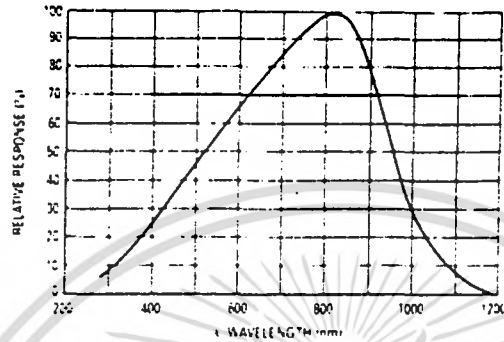


Figure 1. Relative Spectral Response

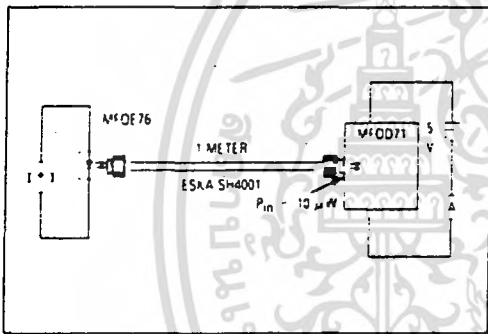


Figure 2. Responsivity Test Configuration

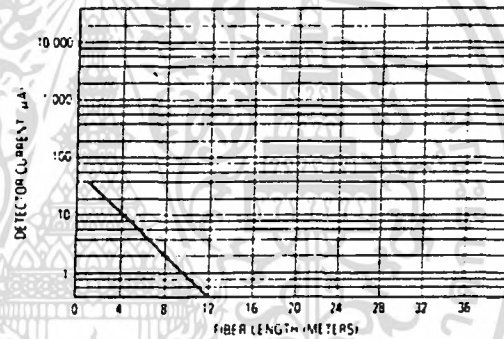


Figure 3. Detector Current versus Fiber Length

The system length achieved with a MFOE76 emitter and various detectors, using 1000 micron core plastic fiber (Eska SH4001 or equivalent), depends on the LED forward

current (If) and the responsivity of the detector chosen. Each detector will perform with the MFOE76 up to the distances shown below.

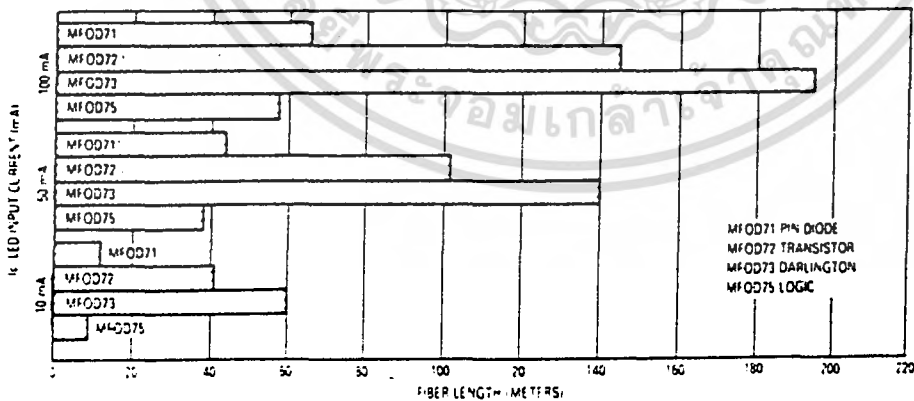


Figure 4. MFOE76 Working Distances



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MFOD71

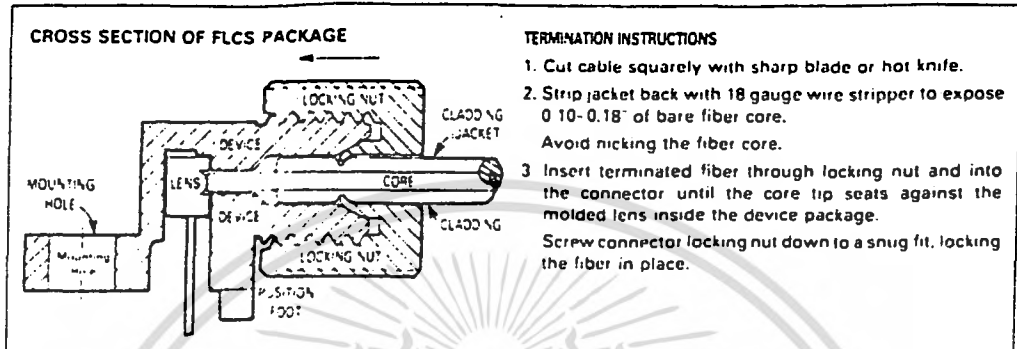


Figure 5. FO Cable Termination and Assembly

INPUT SIGNAL CONDITIONING

The following circuits are suggested to provide the desired forward current through the emitter.

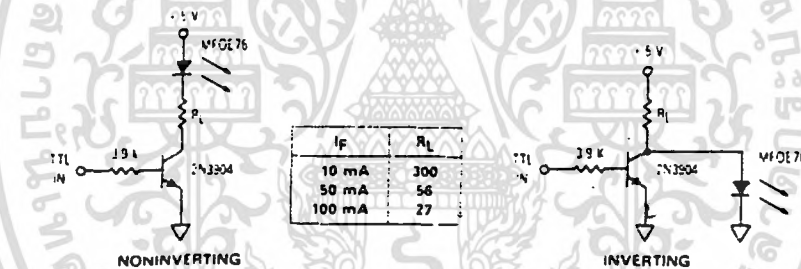


Figure 6. TTL Transmitters

OUTPUT SIGNAL CONDITIONING

The following circuit is suggested to take the MFOD71 detector output and condition it to drive TTL with an acceptable bit error rate.

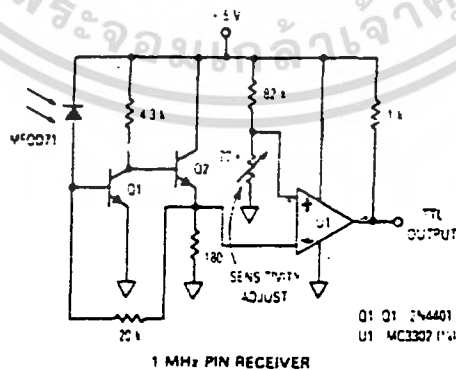
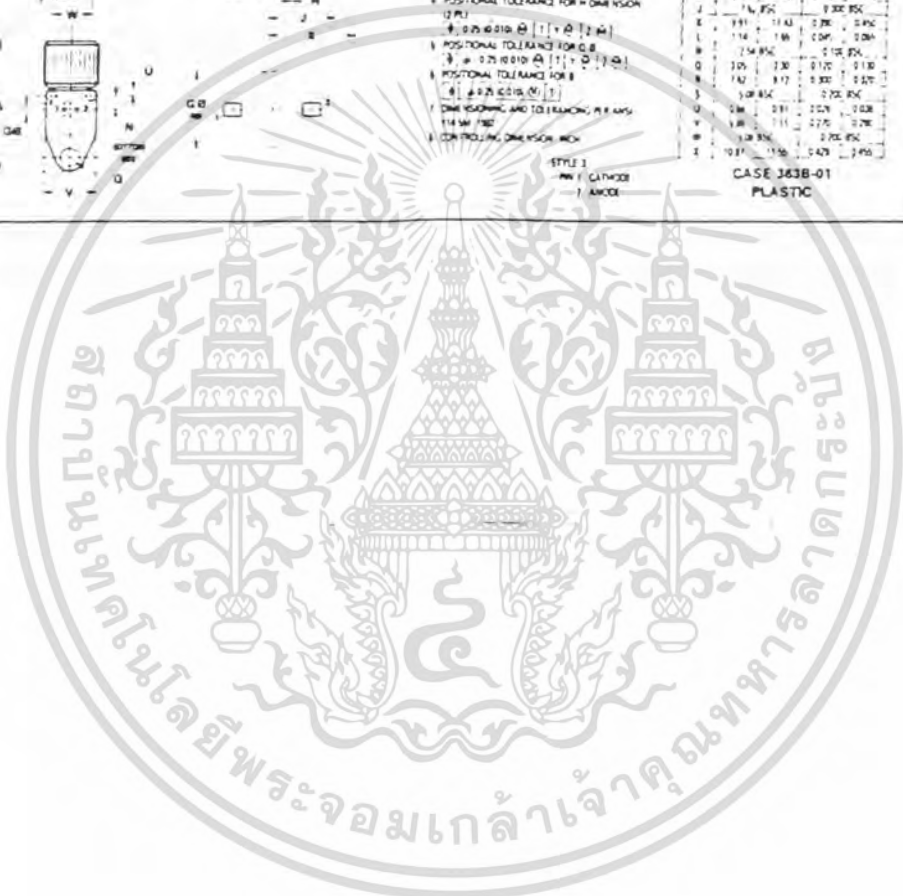
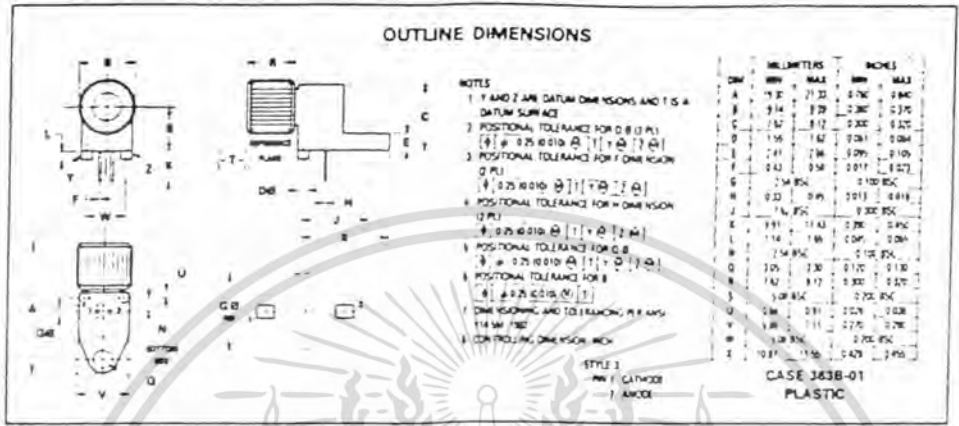


Figure 7. TTL Receiver

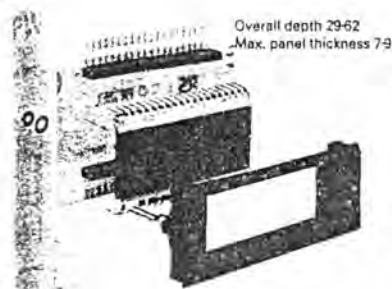
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MFOD71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD



Part No.	bezel size	viewing area	p.c.b. size	panel cut-out
4-4 1/2	69.5 x 28 x 4.4	44.5 x 16.5	71.7 x 54	88 x 23
4-6 1/2	87 x 28 x 4.4	62 x 16.5	89 x 54	85 x 23

Black glass-filled Nylon, low profile, panel bezels with mounting clamps and printed circuit board sockets. The rear PCBs have integral socket strips to accept the RS liquid crystal displays, and are designed to allow connection to the LCD via RS rear-PCB sockets, ribbon cable, 0-1 in edge connectors.

S.S.M. = 1	stock no.
4 and 4 1/2 digit	587-262
6 digit	587-456

Display Filters Non-Reflective



Range of high-quality acrylic optical filters which enhance the display image, with a tough anti-reflective surface coating to reduce spurious reflections from the surface. The filters are suitable for most display panels, see guide below.

Filter Type	Filter	Red	Green	Neutral	Clear
Non-LED					
Monochrome LED					
Color LED					
Low Voltage LED					
High Voltage LED					
Low Discharge					
High Discharge					
Non-phosphorescent					
Phosphorescent					
Red crystal					

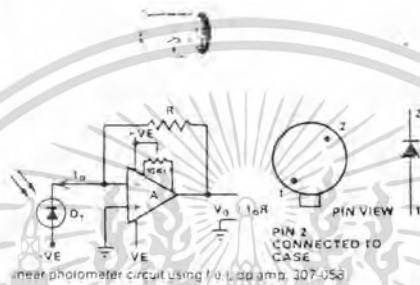
S.S.M. = 1	stock no.
	588-724
	588-730
	588-746
	590-913

Polarised Filters

A circularly polarised filter material which greatly improves the contrast of all LED and filament displays. Size is 110 x 35 x 0.76 mm, but may be cut down with a knife, scissors, etc.

S.S.M. = 1	type	stock no.
	Red	589-238
	Neutral	589-244

Photodiodes Infrared Hermetically Sealed General Purpose



A general purpose photodiode mounted in a TO18 style case with end window. When reverse biased the leakage current increases proportionally with the incident light. Suitable for use in photometers, modulated light detectors or high-speed counting in punched card (300) readers, etc.

technical specification	
Peak spectral response	750nm
Wavelength range	350-1100nm
Change in leakage current with incident light	370µA/mW sensitivity
Dark current (at 20V)	1.8µA typ.
Temp. coeff. of dark current	1% for 10°C temp. rise
Reverse breakdown voltage	60V at 10µA
Temp. coeff. of change in leakage current with illumination @ 35°C	
Max. forward current	100mA
Max. dissipation	300mW at 25°C
Capacitance @ 0V bias	12pF
Response time	1ns typ.
Operating temp.	-40°C to +100°C

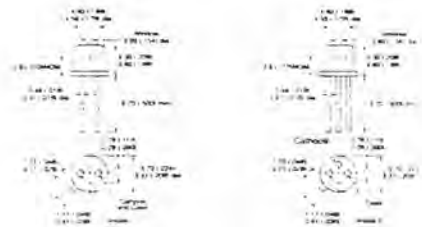
Diode current I_d varies with light from 1 nA to 1 mA typ. Resistor R is chosen to give required output. Typical value 1 MΩ

S.S.M. = 1	stock no.
	305-462

RS Data Sheet

RS Data Sheet No. F14784, March 93 is available on request. See complete sets of RS Data Sheets in the Technical Books Section.

BPX65/BPX65RT NEW N



Supplied to RS by Centronics

Two planar 1 mm² silicon PIN photodiode housed in TO18-style case hermetically sealed with an integral plain glass window. These devices feature low junction capacitance, short switching times and, because of its high frequency response, is capable of detecting wide bandwidth signals. The RT version is a lower cost device with a slightly slower rise time. Applications include alarm systems, shaft encoders, light fluctuation and high speed pulse detection.

technical specification	
Peak spectral response	950 nm
Responsivity at 850 nm	0.65 A/W
Rise time of photo current	
BPX65	1.5ns
BPX65RT	8ns
Capacitance @ 0V bias	15 pF
Wavelength range	350-1100 nm
Operating temp.	-40°C to +100°C
Cut-off frequency	500 MHz
Dark current @ 20V	1.8µA typ. 5mA max.
Dark current @ 20V, 5% I ₀	20 x 10 ⁻¹⁴ W/cm ²
Noise equivalent power @ 20V	250 mW
Breakdown voltage	60 V
Operating temp.	-55°C to +120°C

S.S.M. = 1	stock no.
BPX65	304-346
BPX65RT	846-755

RS Data Sheet

RS Data Sheet No. F14784, March 92 is available on request. See complete sets of RS Data Sheets in the Technical Books Section.

How to Order

- Please order the number of priced units you require of each stock number ensuring that the quantity ordered is divisible by the S.S.M.
- Products are only available in multiples of the S.S.M.
- For more information, see the introductory pages of this

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T018 Sharp Emitter & Silicon Phototransistors



Supplied to RS by Sharp

The GL514 is a narrow beam angle GaAs emitter the PT510 is a narrow acceptance angle silicon phototransistor providing good on-axis coupling characteristics. The PT550F is a high sensitivity silicon phototransistor with a wide acceptance angle allowing for an even response over a wide area. Each device is housed in high quality hermetically sealed TO18 package. The GL514 & PT510 have a rounded lens, the PT550F has a flat window. These devices are particularly suited to demanding applications in harsh environments where extended temperature range and high power dissipation are important.

Technical specification

Emitters		Peak wavelength	
V _f (max.)	1.35V	320nm	
V _f (min.)	8V	Power dissipation	250mW
I _f (max.)	2A	Beam angle	14°
I _f (peak)	5.35mA		
Radiant power	5.35mW		
Operating temp.	-40°C to +125°C		
Detectors		Acceptance angle	
V _f (max.)	35V	PT510	14°
I _c (max.)	100mA	PT550F	100°
I _c (typ.)	20mA	Peak wavelength	800nm
I _c (max.)	100mA	Rise time	2.5µs
I _c (typ.)	2.5mA	PT510	350µs
I _c (max.)	3mA	PT550F	300µs
Dark current		Fall time	
PT510	2nA	PT510	8µs
PT550F	100pA	PT550F	300µs
Power dissipation			
PT510	75mW		
PT550F	150mW		
Operating temp.			
PT510	-25°C to +125°C		
PT550F	-25°C to +125°C		

S.S.M. = 1

type	stock no.
GL514	195-580
PT510	195-596
PT550F	195-603

T046 Honeywell GaAs/GaAlAs Emitters & Silicon Phototransistors



infra-red emitters and silicon phototransistors. The emitters are available with medium or high output powers, both types having narrow or wide beam angles. The phototransistors are high sensitivity devices available with narrow or wide acceptance angles. Each device is housed in a high quality hermetically sealed TO46 package. The SE3455, SE3470 and SD3443 all have flat windows where as the other devices have rounded glass lens. These devices are particularly suited to demanding applications in harsh environments where extended temperature range and high power dissipation are important.

Technical specification

Emitters		Peak wavelength	
SE3455/SE5455		925nm	
V _f (max.)	1.7V	Power dissipation	150mW
V _f (min.)	3V	Beam angle	
I _f (max.)	100mA	SE3455	90°
Radiant power	4.8mW	SE5455	20°
Rise/fall time	0.7µs	Operating temperature	-55°C to +125°C
Operating temperature			
SE3470/SE5470		Peak wavelength	880nm
V _f (max.)	1.3V	Power dissipation	150mW
V _f (min.)	3V	Beam angle	
I _f (max.)	100mA	SE3470	90°
Radiant power (min)	SE3470	SE5470	20°
SE3470	10.5mW/cm ²	Rise/fall time	0.7µs
SE5470	2.8mW/cm ²	Operating temperature	-55°C to +125°C
Operating temperature			
Detectors		Acceptance angle	
V _f (max.)	30V	SD3443	90°
V _f (min.)	3V	SD5443	18°
I _c (max.)	100mA	Rise/fall time	5µs
Radiant power	30mA	Power dissipation	150mW
Operating temperature		Operating temperature	-55°C to +125°C

S.S.M. = 1

type	stock no.
------	-----------

Emitters		Peak wavelength	
GaAs SE3455	195-883	925nm	
GaAs SE5455	195-861	Power dissipation	150mW
GaAlAs SE3470	195-877	Beam angle	
GaAlAs SE5470	195-855	SE3470	90°
Phototransistors		SE5470	20°
SD3443	195-806	Rise/fall time	0.7µs
SD5443	195-899	Operating temperature	-55°C to +125°C

T046 Optek GaAlAs Emitters



Supplied to RS by Optek

The OP232 and OP232W are high power GaAlAs infra-red emitters. The OP232 has a narrow beam angle providing high on-axis intensity and hence excellent coupling characteristics, the OP232W has a wide beam angle allowing illumination over a wide area. Both devices are housed in high quality hermetically sealed TO46 packages. The OP232W has a rounded lens, the OP232 has a flat lens, both devices are particularly suited to demanding applications in harsh environments where extended temperature range and high power dissipation are important.

Technical specification

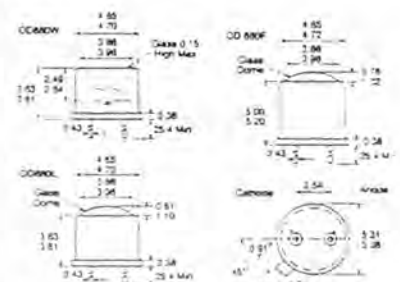
Emitters		Peak wavelength	
V _f (max.)	2V	390nm	
V _f (min.)	3V	Power dissipation	200mW
I _f (max.)	100mA	Beam angle	
Radiant power		OP232	18°
OP232	2mW/cm ²	OP232W	50°
OP232W	2.8mW/cm ²	Rise time	500ns
Operating temperature		Fall time	150ns
		Operating temperature	-55°C to +150°C

S.S.M. = 1

type	stock no.
------	-----------

Emitters		Peak wavelength	
OP232	195-259	390nm	
OP232W	195-243	Power dissipation	200mW

T046 Opto-Diode GaAlAs Emitter



Supplied to RS by Opto-Diode

A range of very high efficiency non-coherent GaAlAs infra-red emitters. These devices have very high output powers and are available with wide, medium and very narrow beam angles. Each device is housed in a very high quality hermetically sealed TO46 package complete with gold plated contacts. The OD880W has a flat lens, the others have rounded lenses. These devices are particularly suited to applications where high reliability and very high output powers are important especially in harsh or demanding environments.

Technical specification

Emitters		Peak wavelength	
V _f (max.)	3V	850nm	
V _f (min.)	3V	Power dissipation	150mW
I _f (max.)	100mA	Beam angle	
I _f (peak)	3A	OD880W	10°
Radiant power		OD880L	18°
OD880W	5mW/cm ²	OD880F	20°
OD880L	50mW/cm ²	Rise/fall time	0.5µs
OD880F	125mW/cm ²	Operating temperature	-55°C to +100°C

S.S.M. = 1

type	stock no.
------	-----------

Emitters		Peak wavelength	
OD880W	195-439	850nm	
OD880L	195-445	Power dissipation	150mW
OD880F	195-451	Beam angle	

Need More Information?

The RS Data Library forms a unique source of detailed technical data on thousands of RS products.

Containing hundreds of data sheets written by experienced, technical engineers, the RS Data Library expands greatly on our concise catalogue information. The library combines manufacturers' data with true 'hands on' applications experience and the wealth of facilities in the RS laboratory.

Refer to Technical Books, Section 74, for more details.

How to Order

Please order the number of priced units you require of each stock number ensuring that the quantity ordered is divisible by the S.S.M.

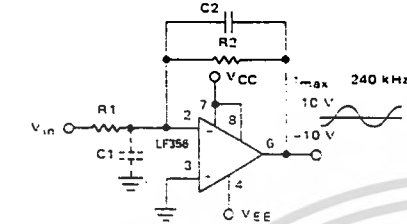
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

TYPICAL APPLICATIONS

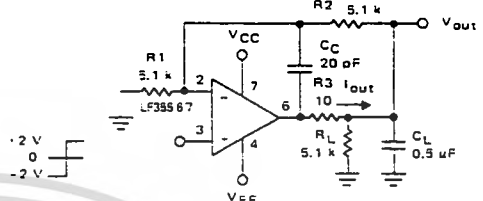
2

FIGURE 37 — WIDE BW, LOW NOISE, LOW DRIFT AMPLIFIER



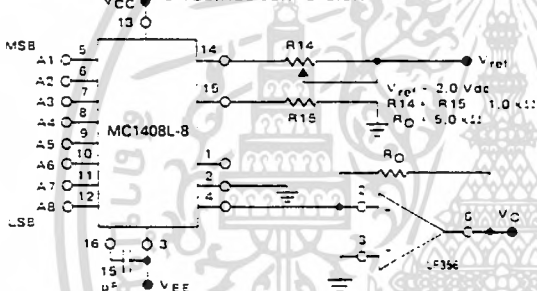
- Power BW: $f_{max} = \frac{5}{2\pi f_p} = 240 \text{ kHz}$
- Parasitic input capacitance (C1) + 3 pF for LF355, LF356 and LF357 plus any additional layout capacitance interacts with feedback elements and creates undesirable high frequency pole. To compensate add C2 such that $R2C2 = R1C1$.

FIGURE 38 — ISOLATING LARGE CAPACITIVE LOADS



- Overload: 5%
 - $t_r = 10 \mu\text{s}$
 - When driving large C_L , the V_{out} slew rate is determined by C_L and $v_{out\ max}$.
- $$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = \frac{v_{out\ max}}{C_L} = \frac{0.02 \text{ V us}}{0.5} = 0.04 \text{ V us (with } C_L \text{ shown)}$$

FIGURE 39 — 8-BIT D/A WITH OUTPUT CURRENT TO VOLTAGE CONVERSION



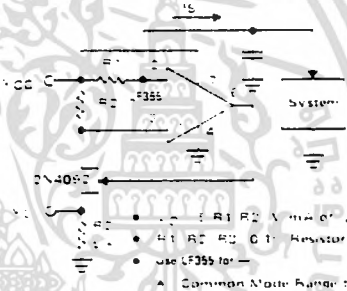
Theoretical V_O

$$V_O = \frac{V_{ref}}{R_{14}} \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \frac{A_3}{8} + \frac{A_4}{16} + \frac{A_5}{32} + \frac{A_6}{64} + \frac{A_7}{128} + \frac{A_8}{256} \right)$$

Adjust V_{ref} , R_{14} or R_{15} so that V_O with all digital inputs at high level is equal to 9.961 volts.

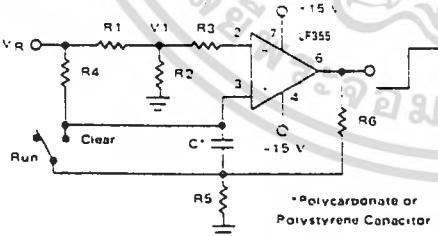
$$V_O = \frac{2V}{1\ \mu} \left(\frac{255}{256} \right) = 9.961 \text{ V}$$

FIGURE 40 — PRECISION CURRENT MONITOR



- Use LF355 for:
 - ▲ Common Mode Range to Supply Range
 - ▲ Low I_{IS}
 - ▲ Low V_{IO}
 - ▲ Low Supply Current

FIGURE 41 — LONG INTERVAL RC TIMER

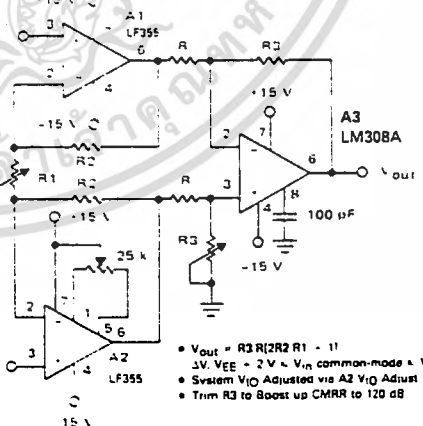


Time (t) = $R_4 C_1 (V_R / V_R - V_i)$, $R_3 = R_4$, $R_5 = 0.1 R_6$
 If $R_1 = R_2$, $t = 0.693 R_4 C_1$

Design Example: 100 Second Timer

$V_R = 10 \text{ V}$, $C_1 = 1 \mu\text{F}$, $R_3 = R_4 = 144 \text{ k}$
 $R_6 = 20 \text{ k}$, $R_5 = 2 \text{ k}$, $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}$

FIGURE 42 — HIGH IMPEDANCE, LOW DRIFT INSTRUMENTATION AMPLIFIER



- $V_{out} = R_3 R_2 R_1 \cdot I$
- $V_{EE} = -2 \text{ V}$, V_{in} common-mode $\approx V_{CC}$
- System V_{IO} Adjusted via A2 V_{IO} Adjust
- Trim R_3 to Boost up CMRR to 120 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

TYPICAL AC PERFORMANCE CHARACTERISTICS

GAIN BANDWIDTH PRODUCT

2

FIGURE 13 — (LF355 SERIES)

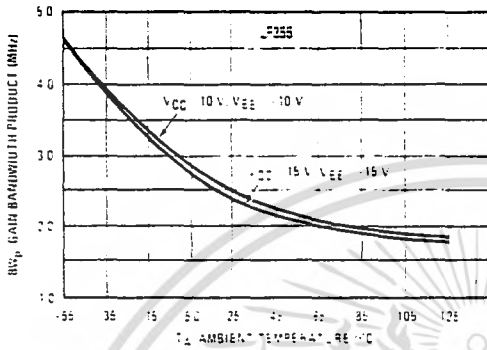
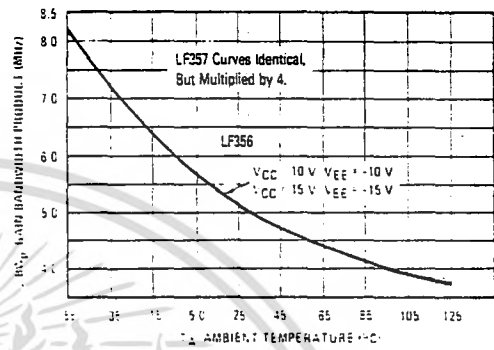


FIGURE 14 — (LF356/357 SERIES)



INVERTER SETTLING TIME

FIGURE 15 — (LF355 SERIES)

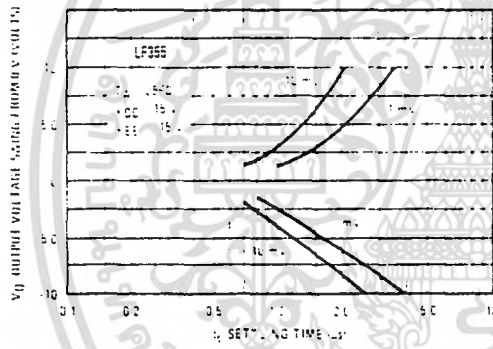


FIGURE 16 — (LF356 AND LF357 SERIES)

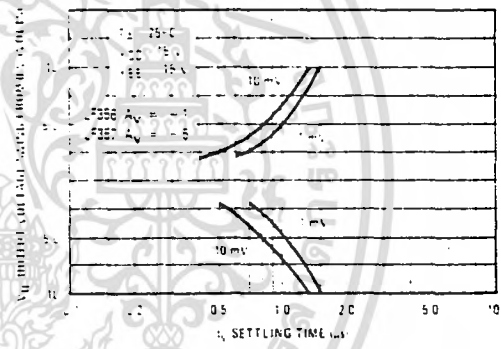


FIGURE 17 — NORMALIZED SLEW RATE

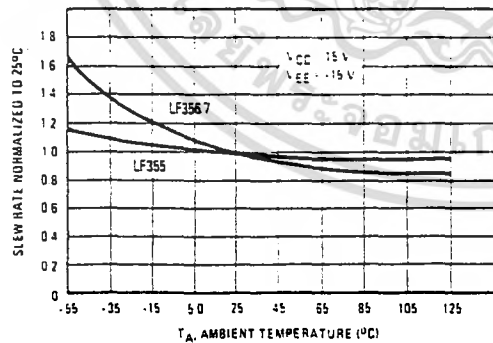
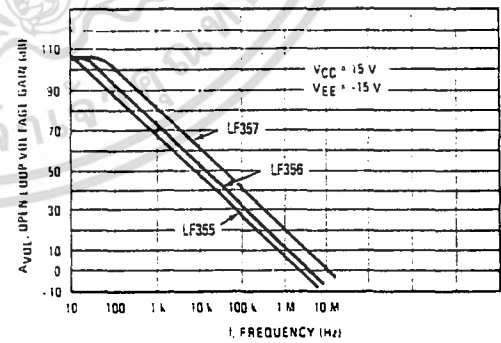


FIGURE 18 — OPEN LOOP FREQUENCY RESPONSE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

TYPICAL AC PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

2

FIGURE 25 — COMMON-MODE REJECTION RATIO

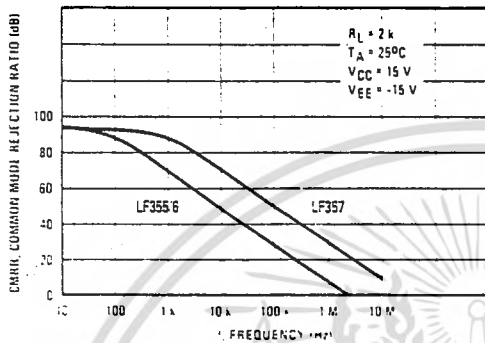
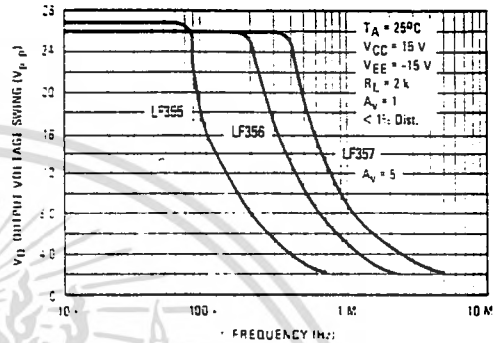


FIGURE 26 — UNDISTORTED OUTPUT VOLTAGE SWING



POWER SUPPLY VOLTAGE REJECTION RATIO

FIGURE 27 — (LF355 SERIES)

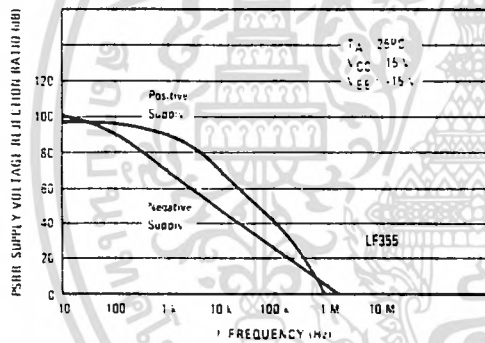
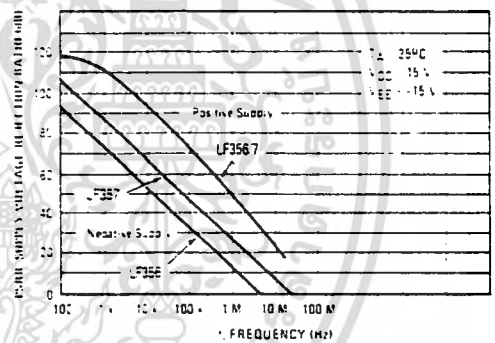


FIGURE 28 — (LF356 AND LF357 SERIES)



EQUIVALENT NOISE VOLTAGE

FIGURE 29 — (LF355, 356/357 SERIES)

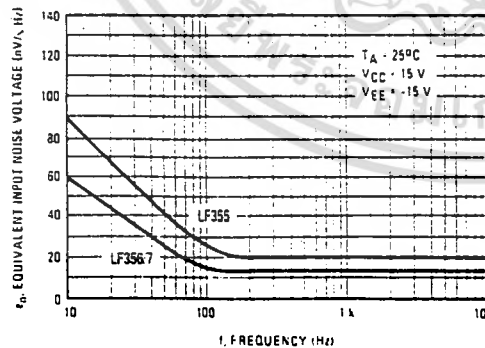
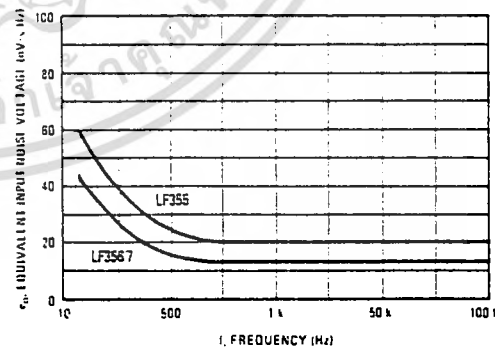


FIGURE 30 (EXPANDED SCALE)

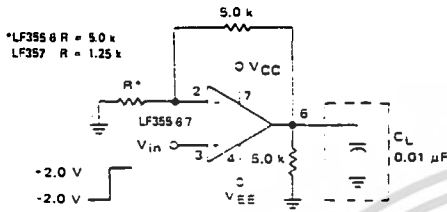


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

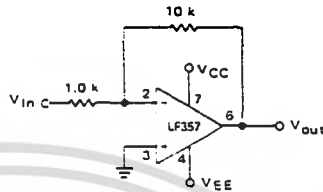
TYPICAL CIRCUIT CONNECTIONS

FIGURE 31 — DRIVING CAPACITIVE LOADS



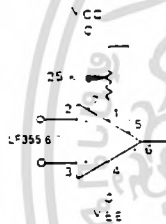
Due to a unique output stage design these amplifiers have the ability to drive large capacitive loads and still maintain stability
 $C_{L(max)} = 0.01 \mu F$
 Overshoot = 20%
 Settling time $t_s = 5.0 \mu s$

FIGURE 32 — LARGE POWER BANDWIDTH AMPLIFIER



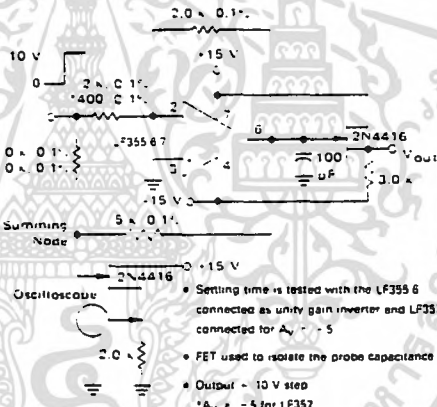
For distortion < 1% and a 20 V_{pk} V_{out} swing, power bandwidth is 500 kHz.

FIGURE 33 — INPUT OFFSET VOLTAGE ADJUSTMENT



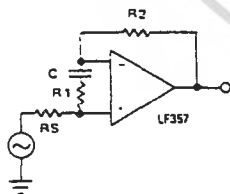
- V_{IO} is adjusted with a 25 k potentiometer.
- The potentiometer wiper is connected to V_{CC} .
- For potentiometers with temperature coefficient of 100 ppm/°C or less the additional drift with adjust is 0.5 μV /°C/mV of adjustment.
- Typical overall drift: 5.0 μV /°C; 10.5 μV /°C/mV of adjustment.

FIGURE 34 — SETTLING TIME TEST CIRCUIT



- Settling time is tested with the LF355/6 connected as unity gain inverter and LF357 connected for $A_v = -5$.
- FET used to isolate the probe capacitance.
- Output = 10 V step
- $A_v = -5$ for LF357

FIGURE 35 — NONINVERTING UNITY GAIN OPERATION FOR LF357



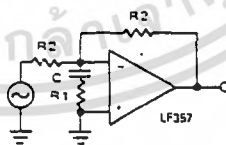
$$R1C > \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

$$R1 = \frac{R2 \cdot RS}{4}$$

$$A_v(DC) = 1$$

$$f_{3dB} = 5 \text{ MHz}$$

FIGURE 36 — INVERTING UNITY GAIN FOR LF357



$$R1C > \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

$$R1 = \frac{R2}{4}$$

$$A_v(DC) = -1$$

$$f_{3dB} = 5 \text{ MHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ to 20 V, $V_{EE} = -15$ to -20 V for LF355B/356B/357B; $V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V for LF355/356/357; $T_A = 0^\circ\text{C}$ to -70°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	LF355B/6B/7B			LF355/6/7			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage ($R_S = 50 \Omega$, $V_{CM} = 0$) ($T_A = 25^\circ\text{C}$) (Over Temperature)	V_{IO}	—	3.0	5.0	—	3.0	10	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage ($R_S = 50 \Omega$)	$\Delta V_{IO} / \Delta T$	—	5.0	—	—	5.0	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Change in Average TC with V_{IO} Adjust ($R_S = 50 \Omega$) (Note 2)	$\Delta TC / \Delta V_{IO}$	—	0.5	—	—	0.5	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ per mV
Input Offset Current ($V_{CM} = 0$) (Note 3) ($T_J = 25^\circ\text{C}$) ($T_J \leq 70^\circ\text{C}$)	I_{IO}	—	3.0	20	—	3.0	50	pA
Input Bias Current ($V_{CM} = 0$) (Note 3) ($T_J = 25^\circ\text{C}$) ($T_J \leq 70^\circ\text{C}$)	I_{IB}	—	30	200	—	30	200	pA
Input Resistance ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	r_i	—	10^{12}	—	—	10^{12}	—	Ω
Large Signal Voltage Gain ($V_O = 10$ V, $R_L = 2.0$ k, $V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V) ($T_A = 25^\circ\text{C}$) ($0^\circ\text{C} < T_A \leq -70^\circ\text{C}$)	A_{VOL}	50	200	—	25	200	—	V/mV
Output Voltage Swing ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V, $R_L = 10$ k) ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V, $R_L = 2$ k)	V_O	± 12 ± 10	± 13 ± 12	—	± 12 ± 10	± 13 ± 12	—	V
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V)	V_{ICR}	± 11	-15.1 -12.0	—	± 10	-15.1 -12.0	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	85	100	—	80	100	—	dB
Supply Voltage Rejection Ratio (Note 4)	PSRR	85	100	—	80	100	—	dB
Supply Current ($T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V)	I_D	—	2.0	4.0	—	2.0	4.0	mA
		—	5.0	7.0	—	5.0	10	
		—	—	—	—	—	—	

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ V, $V_{EE} = -15$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$)

Characteristic	Symbol	LF355B/355			LF356B/356			LF357B/357			Unit	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
Slew Rate (Note 5) ($A_V = 1$) LF355/356 ($A_V = 5$) LF357	SR	—	5.0	—	7.5	12	—	—	30	50	—	V/ μs
Gain-Bandwidth Product	GBW	—	2.5	—	—	5.0	—	—	20	—	—	MHz
Settling Time to 0.01% (Note 6)	t_s	—	4.0	—	—	1.5	—	—	1.5	—	—	μs
Equivalent Input Noise Voltage ($R_S = 100 \Omega$, $f = 100$ Hz) ($R_S = 100 \Omega$, $f = 1000$ Hz)	e_n	—	25	—	—	15	—	—	15	—	—	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Equivalent Input Noise Current ($f = 100$ Hz) ($f = 1000$ Hz)	i_n	—	0.01	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
Input Capacitance	C_i	—	3.0	—	—	3.0	—	—	3.0	—	—	pF

NOTES

- Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply.
- The temperature coefficient of the adjusted input offset voltage changes only a small amount (0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ typical) for each mV of adjustment from its original unadjusted value. Common-mode rejection and open loop voltage gain are also affected by offset adjustment.
- The input bias currents approximately double for every 10°C rise in junction temperature, T_J . Due to limited test time, the input bias currents are correlated to junction temperature. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.
- Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously, in accordance with common practice.
- The Min. slew rate limits apply for the LF356B and the LF357B, but do not apply for the LF356 or LF357.
- Settling time is defined here, for a unity gain inverter connection using 2.0 k resistors for the LF355 B. It is the time required for the error voltage (the voltage at the inverting input pin on the amplifier) to settle to within 0.01% of its final value from the time a 10 V step input is applied to the inverter. For the LF357, $A_V = -5.0$, the feedback resistor from output to input is 2.0 k and the output step is 10 V (see settling time test circuit).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

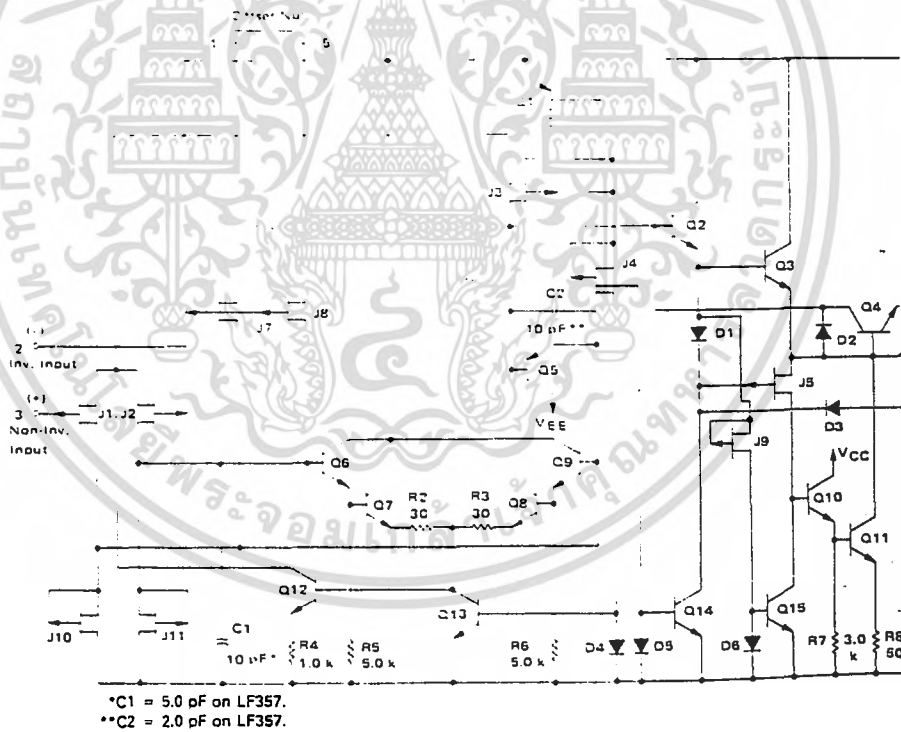
2

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	LF355B/ 356B/357B	LF355/356/357	Unit
Supply Voltage	V _{CC} V _{EE}	-22 -22	-18 -18	V
Differential Input Voltage	V _{ID}	±40	±30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V _{IDP}	±20	±16	V
Output Short-Circuit Duration	T _S	Continuous		
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to -70		°C
Operating Junction Temperature	T _J	150		°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to -150		°C

Note 1. Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

CIRCUIT SCHEMATIC



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LF355, LF356,
LF357*, LF355B,
LF356B, LF357B***

**MONOLITHIC JFET INPUT
OPERATIONAL AMPLIFIERS**

These internally compensated operational amplifiers incorporate highly matched JFET devices on the same chip with standard bipolar transistors. The JFET devices enhance the input characteristics of these operational amplifiers by more than an order of magnitude over conventional amplifiers.

This series of op amps combines the low current characteristics typical of FET amplifiers with the low noise offset voltage and offset voltage stability of bipolar amplifiers. Also, nulling the offset voltage does not degrade the drift or common mode rejection.

- Low Input Bias Current - 30 pA
- Low Input Offset Current - 3.0 pA
- Low Input Offset Voltage - 1.0 mV
- Temperature Compensation of Input Offset Voltage - 3.0 μ V/°C
- Low Input Noise Current - 0.01 pA/√Hz
- High Input Impedance - 10^{12} Ω
- High Common Mode Rejection Ratio - 100 dB
- High DC Voltage Gain - 106 dB

SERIES FEATURES

- LF355-355B — Low Power Supply Current
- LF356-356B — Wide Bandwidth
- LF357-357B — Wider Bandwidth Decompensated ($A_{Vmin} = 5$)

	LF355-355B	LF356-356B	LF357-357B
Fast Settling Time to 0.01%	4.0 μ s	1.5 μ s	1.5 μ s
Fast Slew Rate	5.0 V/ μ s	12 V/ μ s	50 V/ μ s
Wide Gain Bandwidth	2.5 MHz	5.0 MHz	20 MHz
Low Input Noise Voltage	20 nV/ \sqrt Hz	12 nV/ \sqrt Hz	12 nV/ \sqrt Hz

ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
LF355BH,H		Metal Can
LF355BJ,J		Ceramic DIP
LF356H	0 to +70°C	Metal Can
LF356BJ,J		Ceramic DIP
LF357BH,H		Metal Can
LF357BJ,J		Ceramic DIP

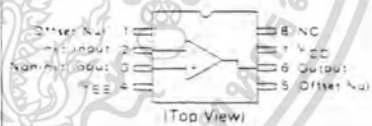
**MONOLITHIC JFET
OPERATIONAL AMPLIFIERS**

**SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS**

**H SUFFIX
METAL PACKAGE
CASE 60***



**J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 693**



APPLICATIONS

The LF series is suggested for all general purpose JFET input amplifier requirements where precision and frequency response flexibility are of prime importance.

Specific applications include:

- Sample and Hold Circuits
- High Impedance Buffers
- Fast D/A and A/D Converters
- Precision High Speed Integrators
- Wideband, Low Noise, Low Drift Amplifiers

*NOTE: The LF357-357B are designed for wider bandwidth applications. They are decompensated ($A_{Vmin} = 5$).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF355, LF356, LF357, LF355B, LF356B, LF357B

TYPICAL AC PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

BODE PLOT

FIGURE 19 — (LF355 SERIES)

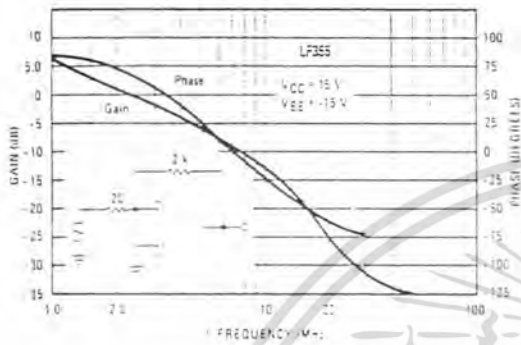


FIGURE 20 — (LF356 SERIES)

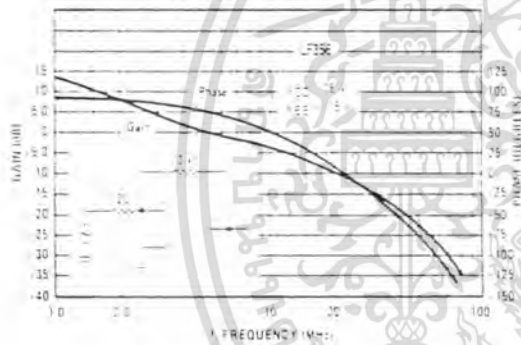
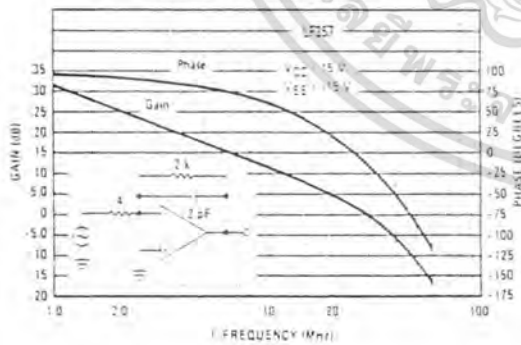


FIGURE 21 — (LF357 SERIES)



OUTPUT IMPEDANCE

FIGURE 22 — (LF355 SERIES)

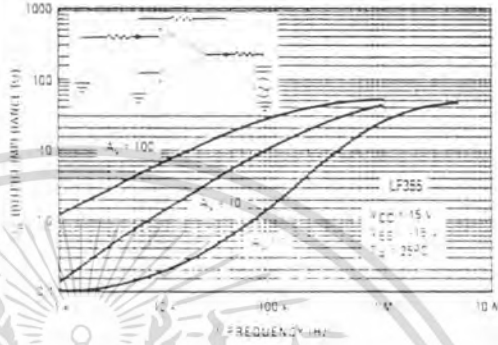
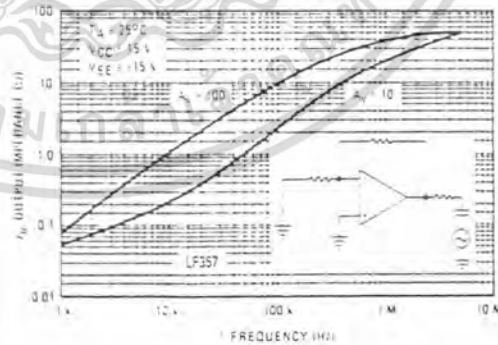


FIGURE 23 — (LF356 SERIES)



FIGURE 24 — (LF357 SERIES)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MOTOROLA

NE565A

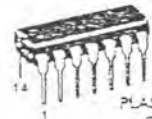
PHASE-LOCKED LOOP

SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS

PHASE-LOCKED LOOP

The NE565A is designed for general-purpose phase-locked loop applications to 500 kHz.

- Stable Center Frequency - 200 ppm/°C (Typ)
- Flexible Power Supply Range - ± 5 to ± 12 Volts with Small Frequency Drift - 100 ppm/% (Typ)
- Low Total Harmonic Distortion of Demodulator Output - 1.5% (Max)
- Linear Triangle Wave Output - 0.5% (Typ)
- TTL, DTL Compatible Inputs and Outputs
- Adjustable Hold In Range - $\pm 1\%$ to $>\pm 50\%$



P SUFFIX PLASTIC PACKAGE CASE 646-05

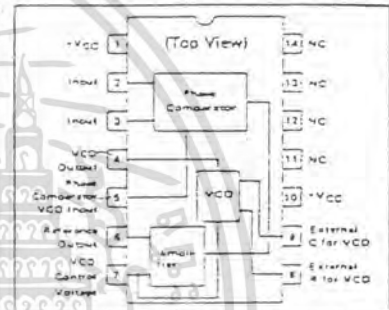
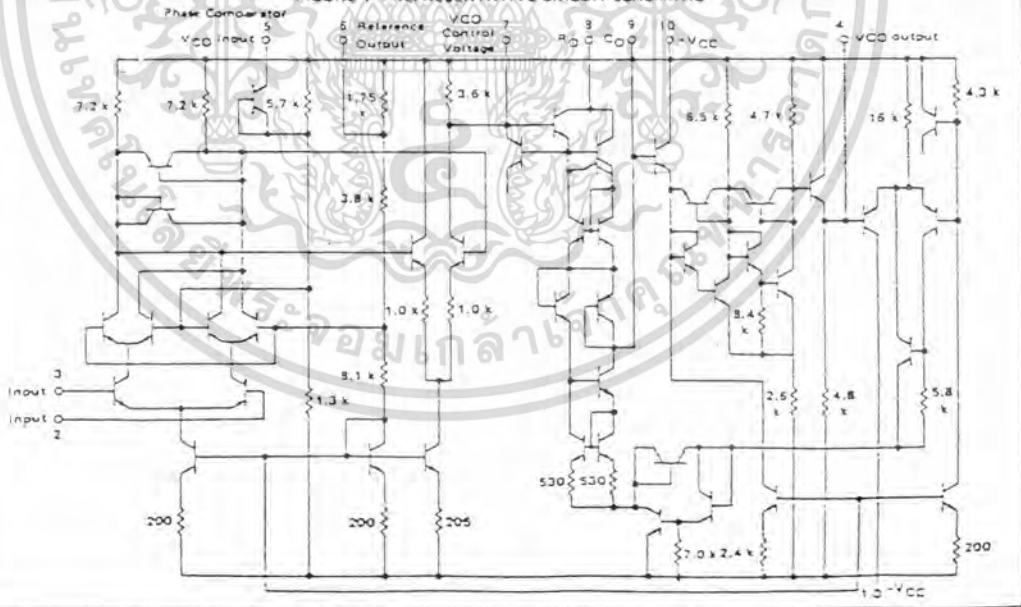


FIGURE 1 - REPRESENTATIVE CIRCUIT SCHEMATIC



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NE565A

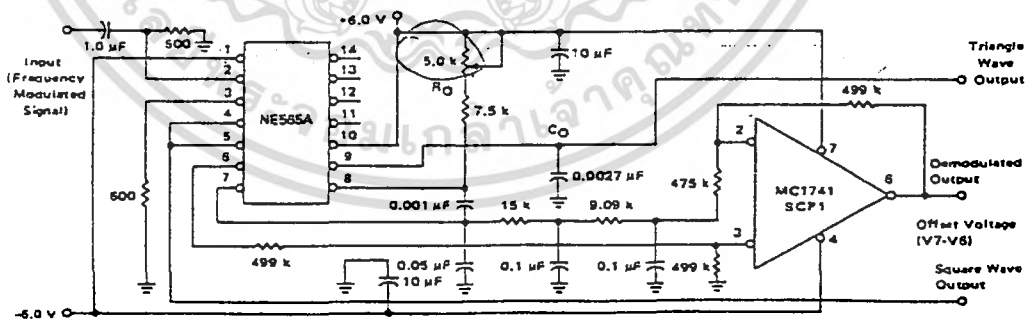
MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	±12	Vdc
Power Dissipation (Package Limitation) Derate above 25°C	P _D	8.25 8.6	mW mW/°C
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to +70	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Test Circuit Figure 2, T_A = 25°C, V_{CC} = ±8.0 Vdc unless otherwise noted.)

Characteristic	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Current	—	8.0	12.5	mA
Input Impedance (Pins 2, 3) -4.0 V < V ₂ , V ₃ < 0 V	—	5.0	—	kΩ
Input Level Required for Tracking f _o = 10 kHz, ±10% Frequency Deviation	10	—	—	mVrms
VCO Maximum Operating Frequency C _o = 2.7 pF	—	500	—	kHz
Operating Frequency Temperature Coefficient	—	200	—	ppm/°C
Frequency Drift with Supply Voltage	—	200	—	ppm/%
Triangle Wave Output Voltage	2.0	2.4	3.0	V _{p-p}
Triangle Wave Output Linearity	—	0.5	—	%
Square Wave Output Level	4.7	5.4	—	V _{p-p}
VCO Output Impedance (Pin 4)	—	5.0	—	kΩ
Square Wave Duty Cycle	40	50	60	%
Square Wave Rise Time	—	20	—	ns
Square Wave Fall Time	—	50	—	ns
Output Current Sink (Pin 4)	0.6	1.0	—	mA
VCO Sensitivity	—	6600	—	Hz/V
Demodulated Output Voltage (Pin 7) f _o = 10 kHz, ±10% Frequency Deviation	200	300	—	mV _{p-p}
Total Harmonic Distortion f _o = 10 kHz, ±10% Frequency Deviation	—	0.2	1.5	%
Output Impedance (Pin 7)	—	1.5	—	kΩ
DC Output Voltage Level (Pin 7)	4.0	4.5	5.0	V
Output Offset Voltage (Input = 0) V ₇ -V ₆	—	50	200	mV
Temperature Drift of V ₇ -V ₆	—	500	—	μV/°C
AM Rejection	—	40	—	dB
Phase Detector Sensitivity K _D	—	0.68	—	V/radian

FIGURE 2 - TEST CIRCUIT SCHEMATIC



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

FIGURE 3 - POWER SUPPLY CHARACTERISTICS

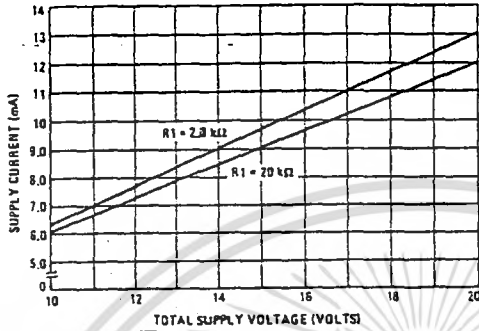


FIGURE 4 - VCO CONVERSION GAIN

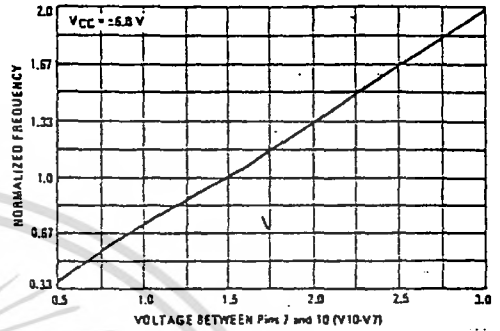


FIGURE 5 - LOCK RANGE versus INPUT VOLTAGE

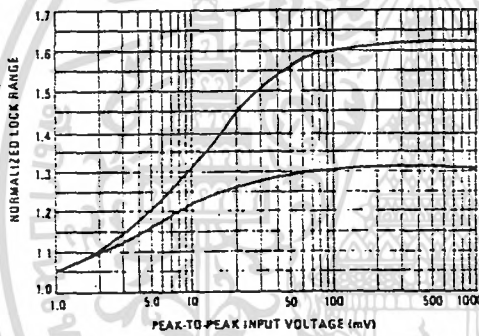


FIGURE 6 - OSCILLATOR OUTPUT WAVEFORMS

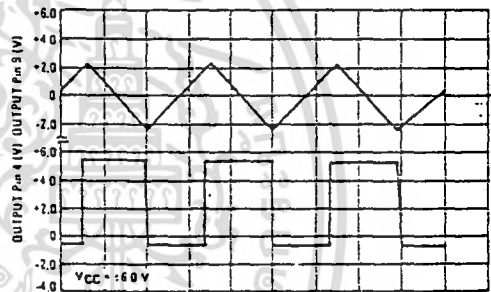


FIGURE 7 - LOCK RANGE (As a Function of Gain Setting Resistance)

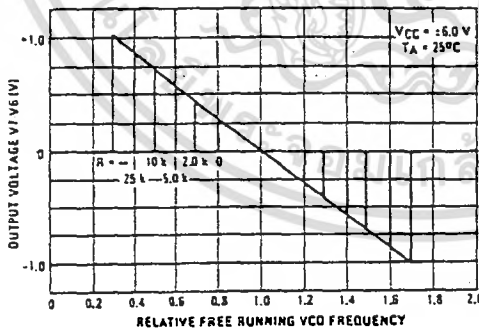
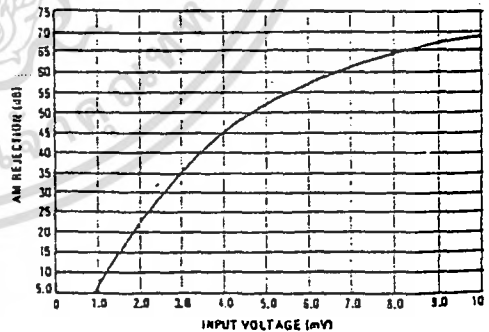


FIGURE 8 - AM REJECTION CHARACTERISTICS



6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERAL APPLICATIONS INFORMATION

The following formulas are useful when designing with the NE565A:

1. Center Frequency - $f_o \approx \frac{1}{3.7 R_O C_O}$

Where: f_o is the frequency of the VCO without input signal. For R_O, C_O circuit location see Figure 2.

2. Loop Gain - $K_O K_D A$

Definitions:

K_O - VCO Conversion Gain - the conversion factor between VCO frequency and control voltage.

$K_O = 4.12 f_o$ (units are in radians/sec/volt)

Example: for VCO Sensitivity @ 10 kHz (in Hz/volt)

$K_O = \frac{4.12 \times 10^4}{2\pi} = 6600 \text{ Hz/Volt}$

K_D - Phase Detector Gain Factor - the conversion factor between the phase detector output voltage and the phase difference between input and VCO signals. Units are in volts/radian.

$K_D = \frac{8.1 \cdot A}{V_{CC}}$

Where: $A = f(R6 \text{ to } R7)$

Hence: $K_D = \frac{8.1}{V_{CC}} [f(R6-R7)]$

Where: V_{CC} is total system supply voltage. $f(R6-R7)$ is internal amplifier gain (See Figure 9). V_{CC} - total supply voltage to the circuit.

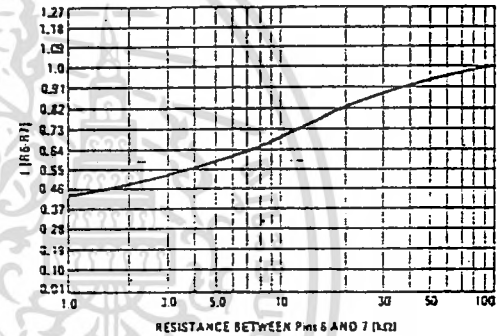
3. Lock Range - $f_L = \pm \frac{8 f_o}{V_{CC}}$

Where: f_L is the range of frequencies in the area of f_o over which the VCO, once locked to the input signal, will remain locked.

4. Capture Range - $f_C = \pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_L}{\tau}}$

Where: f_C is that range of frequencies around f_o over which the loop will acquire lock with an input signal initially starting out of lock. (τ = Time Constant at Pin 7)

FIGURE 9 - INTERNAL AMPLIFIER GAIN CHARACTERISTICS



LM566/LM566C Voltage Controlled Oscillator

General Description

The LM566/LM566C are general purpose voltage controlled oscillators which may be used to generate square and triangular waves, the frequency of which is a very linear function of a control voltage. The frequency is also a function of an external resistor and capacitor.

The LM566 is specified for operation over the -55°C to +125°C military temperature range. The LM566C is specified for operation over the 0°C to +70°C temperature range.

Features

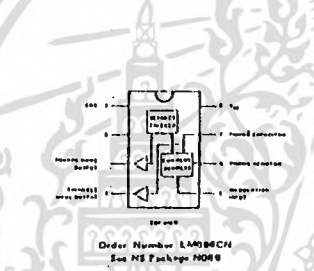
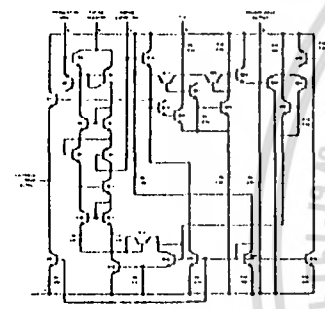
- Wide supply voltage range: 10 to 24 volts
Very linear modulation characteristics

- High temperature stability
Excellent supply voltage rejection
10 to 1 frequency range with fixed capacitor
Frequency programmable by means of current, voltage, resistor or capacitor.

Applications

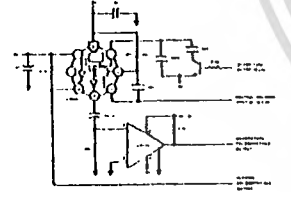
- FM modulation
Signal generation
Function generation
Frequency shift keying
Tone generation

Schematic and Connection Diagrams



Typical Application

1 kHz and 10 kHz TTL Compatible Voltage Controlled Oscillator



Applications Information

The LM566 may be operated from either a single supply as shown in this test circuit, or from a split (+) power supply. When operating from a split supply, the square wave output (pin 4) is TTL compatible (2 mA current sink) with the addition of a 4.7 kΩ resistor from pin 3 to ground.

A 100 μF capacitor is connected between pins 5 and 8 to prevent parasitic oscillations that may occur during VCO switching.

fo = 2(Vc - Vc1) / (R1 C1 V)
where 2K < R1 < 20K and Vc is voltage between pins 5 and pin 1

Absolute Maximum Ratings

Table with 2 columns: Parameter and Value. Includes Supply Voltage (12V), Power Dissipation (300 mW), Differential Input Voltage (11V), Operating Temperature Range (LM566: -55°C to +125°C, LM566C: 0°C to +70°C), Storage Temperature Range (-85°C to +150°C), and Lead Temperature (Soldering: 10 sec, 260°C).

Electrical Characteristics (AC Test Circuit, TA = 25°C, VC = 18V)

Large table with columns: PARAMETER, CONDITIONS, and values for LM566 and LM566C. Rows include Power Supply Current, Input Impedance, VCO Maximum Operating Frequency, Operating Frequency, Frequency Drift, Triangle Wave Output Voltage, Square Wave Output Level, Output Impedance, Square Wave Duty Cycle, Rise/Fall Time, Output Current Sink, VCO Sensitivity, Harmonic Distortion, DC Level, Output Offset Voltage, AM Rejection, and Phase Detector Sensitivity.

Note 1: The maximum junction temperature of the LM566 is 150°C, while that of the LM566C and LM566CN is 100°C. For operation at elevated temperatures, devices in the TO-9 package must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W junction to ambient or 45°C/W junction to case. Thermal resistance of the dual in line package is 100°C/W.

Absolute Maximum Ratings

Table with 2 columns: Parameter and Value. Includes Power Supply Voltage (28V), Power Dissipation (300 mW), and Operating Temperature Range (175°C).

PSRR and CMRR exceed 120dB. These characteristics, coupled with long-term drift of 0.2µV/month, allow the circuit designer to achieve performance levels previously attained only by discrete designs.

Low-cost, high-volume production of the OP-37 is achieved by using on-chip zener-zap trimming. This reliable and stable offset trimming scheme has proved its effectiveness over many years of production history.

The OP-37 brings low-noise instrumentation-type performance to such diverse applications as microphone, tape-head, and RIAA phono preamplifiers, high-speed signal conditioning for data acquisition systems, and wide-bandwidth instrumentation.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 4)

Supply Voltage	±22V
Internal Voltage (Note 1)	±22V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Differential Input Voltage (Note 2)	±0.7V
Differential Input Current (Note 2)	±25mA
Storage Temperature Range	-55°C to +150°C

Operating Temperature Range

OP-37A, OP-37B, OP-37C (J, Z, RC)	-55°C to +150°C
OP-37E, OP-37F (J, Z)	-25°C to +150°C
OP-37E, OP-37F (P)	0°C to +150°C
OP-37G (P, S, J, Z)	-40°C to +150°C

Lead Temperature Range (Soldering, 60 sec) +260°C to +300°C

Junction Temperature -55°C to +150°C

PACKAGE TYPE	θ_{JA} (NOTE 3)	θ_{JC}
TO-99 (J)	150	18
8-Pin Hermetic DIP (Z)	145	18
8-Pin Plastic DIP (P)	103	43
20-Contact LCC (RC, TC)	98	38
8-Pin SO (S)	158	43

NOTES:

- For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
- The OP-37's inputs are protected by back-to-back diodes. Current limiting resistors are not used in order to achieve low noise. If differential input voltage exceeds ±0.7V, the input current should be limited to 25mA.
- θ_{JA} is specified for worst case mounting conditions, i.e., θ_{JA} is socket device in socket for TO, CerDIP, P-DIP, and LCC packages; θ_{JA} is soldered for device soldered to printed circuit board for SO package.
- Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A/E			OP-37B/F			OP-37C/G			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	Note 1	-	10	25	-	20	50	-	30	100	mV
Long-Term V_{OS} Stability	V_{OS} Time	Notes 2, 3	-	0.2	1.0	-	1.3	1.5	-	2.5	2.0	mV/yr
Input Offset Current	I_{OS}		-	-	25	-	3	50	-	10	75	nA
Input Bias Current	I_B		-	±10	±40	-	±12	±55	-	±15	±90	nA
Input Noise Voltage	e_{no-p}	0.1Hz to 10Hz Notes 3, 5	-	0.08	0.18	-	0.08	0.18	-	0.09	0.25	nV/√Hz
Input Noise Voltage Density	e_n	$f_c = 10\text{Hz}$ (Note 3)	-	1.5	3.3	-	1.5	5.5	-	1.8	8.0	nV/√Hz
		$f_c = 30\text{Hz}$ (Note 3)	-	3.1	4.5	-	3.1	4.5	-	3.3	5.6	nV/√Hz
		$f_c = 100\text{Hz}$ (Note 3)	-	1.0	3.8	-	3.0	3.3	-	3.2	4.5	nV/√Hz
Input Noise Current Density	i_n	$f_c = 10\text{Hz}$ (Notes 3, 5)	-	1.7	4.0	-	1.7	4.0	-	1.7	-	pA/√Hz
		$f_c = 30\text{Hz}$ (Notes 3, 5)	-	1.0	2.3	-	1.0	2.3	-	1.0	-	pA/√Hz
		$f_c = 100\text{Hz}$ (Notes 3, 5)	-	0.4	0.6	-	0.4	0.6	-	0.4	0.6	pA/√Hz
Input Resistance - Differential-Mode	R_{id}	Note 7	1.3	6	-	0.94	5	-	0.7	4	MΩ	
Input Resistance - Common-Mode	R_{iCM}		-	3	-	-	2.5	-	-	2	MΩ	
Input Voltage Range	V_{IR}		±11.0	±12.3	-	±11.0	±12.3	-	±11.0	±12.3	-	
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 11V$	114	126	-	106	123	-	100	120	-	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 1V$ to $\pm 8V$	-	1	10	-	1	10	-	2	20	dB
		$f_c \geq 2kHz$, $V_O = \pm 10V$	1000	1800	-	1000	1800	-	700	1500	-	
		$f_c \geq 1kHz$, $V_O = \pm 10V$	300	1500	-	300	1500	-	400	1500	-	
		$f_c = 600Hz$, $V_O = \pm 1V$, $V_S = \pm 4V$, Note 4	253	100	-	250	700	-	200	500	-	
Output Voltage Swing	V_O	$f_c \geq 2kHz$	±12.0	±13.8	-	±12.0	±13.8	-	±11.5	±13.5	-	
		$f_c \geq 600Hz$	±10.0	±11.5	-	±10.0	±11.5	-	±10.0	±11.5	-	
Slew Rate	SR	$f_c \geq 2kHz$, Note 4	11	17	-	11	17	-	11	17	V/µs	
Gain Bandwidth Prod.	GBW	$f_c = 10kHz$, Note 4	45	53	-	35	53	-	45	53	-	
		$f_c = 1MHz$	-	40	-	-	40	-	-	40	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OP-37 LOW-NOISE PRECISION HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER

TYPICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise noted. (Continued)

SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A/E			OP-37B/F			OP-37C/G			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
R_D	$V_O = 0, I_O = 0$	—	70	—	—	70	—	—	70	—	Ω
P_d	$V_O = 0$	—	30	140	—	30	140	—	100	170	mW
R_{in}	$R_{in} = 10k\Omega$	—	± 4.0	—	—	± 4.0	—	—	± 4.0	—	mV

Offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power. A/E grades guaranteed fully warmed up.
Input offset voltage stability refers to the average trend line of the input offset voltage over extended periods after the first 30 days of operation. Changes in V_{OS} during the first 30

- days are typically $2.5\mu V$ — refer to typical performance curve.
 3. Sample tested.
 4. Guaranteed by design.
 5. See test circuit and frequency response curve for 0.1Hz to 10Hz tester.
 6. See test circuit for current noise measurement.
 7. Guaranteed by input bias current.

TYPICAL CHARACTERISTICS for $V_S = \pm 15V$, $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$, unless otherwise noted.

SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A			OP-37B			OP-37C			UNITS	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
Offset Voltage	V_{OS} Note 1	—	30	50	—	50	200	—	70	300	μV	
Offset Drift	TCV_{OS} Note 2	—	0.2	0.5	—	0.3	1.3	—	0.4	1.8	$\mu V/^\circ C$	
Offset Drift	TCV_{OSn} Note 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$\mu V/^\circ C$	
Input Current	I_{OS}	—	3	50	—	22	35	—	30	135	nA	
Input Current	I_B	—	± 20	± 50	—	± 28	± 65	—	± 35	± 150	nA	
Common-Mode Range	V _{CR}	± 10.0	± 11.5	—	± 10.0	± 11.5	—	± 10.2	± 11.5	—	V	
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 10V$	108	123	—	100	119	—	94	116	dB	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 4.5V$ to $\pm 15V$	—	2	16	—	2	16	—	4	51	$\mu V/V$
Open-Loop Gain	A_{VOL}	$R_L \geq 2k\Omega, V_O = \pm 10V$	500	1200	—	300	1000	—	300	800	V/mV	
Common-Mode Voltage	V_{CM}	$R_L \geq 2k\Omega$	± 10.5	± 13.5	—	± 11.0	± 13.2	—	± 10.5	± 13.0	V	

TYPICAL CHARACTERISTICS for $V_S = \pm 15V$, $-25^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$ for OP-37EJ/FJ and OP-37EZ/FZ, $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$ for OP-37EP/FP and $-40^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$ for OP-37GP/GS/GJ/GZ, unless otherwise noted.

SYMBOL	CONDITIONS	OP-37E			OP-37F			OP-37G			UNITS	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
Offset Voltage	V_{OS}	—	30	50	—	40	140	—	35	300	μV	
Offset Drift	TCV_{OS} Note 2	—	0.2	0.5	—	0.3	1.3	—	0.4	1.8	$\mu V/^\circ C$	
Offset Drift	TCV_{OSn} Note 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$\mu V/^\circ C$	
Input Current	I_{OS}	—	10	50	—	14	35	—	20	135	nA	
Input Current	I_B	—	± 14	± 20	—	± 15	± 35	—	± 25	± 150	nA	
Common-Mode Range	V _{CR}	± 10.5	± 11.3	—	± 10.5	± 11.3	—	± 10.5	± 11.8	—	V	
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 10V$	110	124	—	102	121	—	96	115	dB	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 4.5V$ to $\pm 15V$	—	2	15	—	2	16	—	2	22	$\mu V/V$
Open-Loop Gain	A_{VOL}	$R_L \geq 2k\Omega, V_O = \pm 10V$	150	1500	—	100	1000	—	150	1000	V/mV	
Common-Mode Voltage	V_{CM}	$R_L \geq 2k\Omega$	± 11.7	± 13.5	—	± 11.4	± 13.5	—	± 11.0	± 13.1	V	

Offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power. A/E grades guaranteed fully warmed up.

2. The TCV_{OS} performance is within the specifications unpuled or when pulled with $R_{in} = 8k\Omega$ to $20k\Omega$. TCV_{OS} is 100% tested for A/E grades, sample tested for B/C/F/G grades.
 3. Guaranteed by design.

5
OPERATIONAL AMPLIFIERS/BUFFERS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 การดัดแปลงหรือแก้ไขใดๆ ล้วนต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM386 low voltage audio power amplifier

general description

The LM386 is a power amplifier designed for use in low voltage consumer applications. The gain is internally set to 20 to keep external part count low, but the addition of an external resistor and capacitor between pins 1 and 8 will increase the gain to any value up to 200.

The inputs are ground referenced while the output is automatically biased to one half the supply voltage. The quiescent power drain is only 24 milliwatts when operating from a 6 volt supply, making the LM386 ideal for battery operation.

features

- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range
- Low quiescent current drain

4-12 Volts

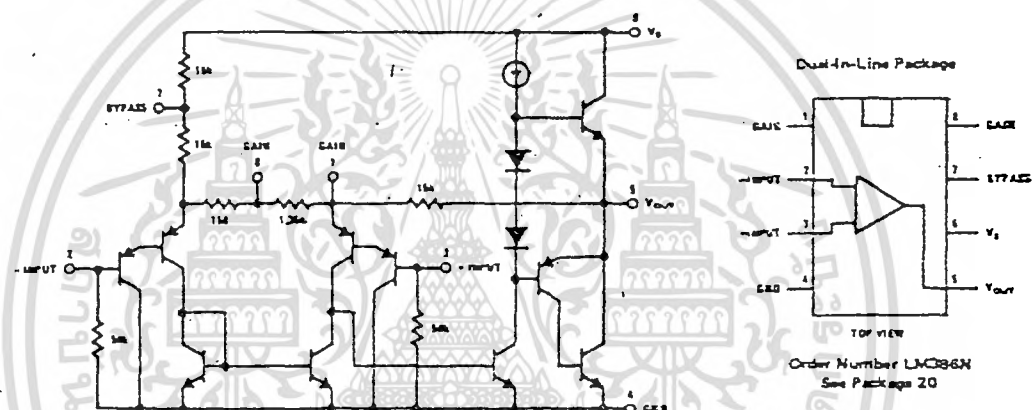
4 mA

- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-centering output quiescent voltage
- Low distortion
- Eight pin dual-in-line package

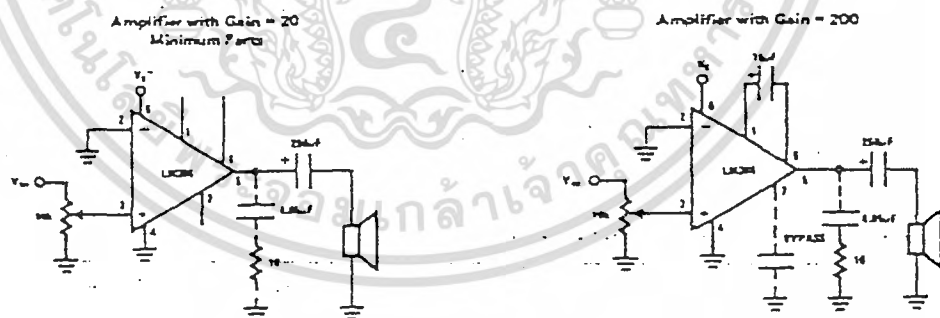
applications

- AM-FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

equivalent schematic and connection diagrams



typical applications



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

absolute maximum ratings

Supply Voltage (Note 1)	15V
Package Dissipation 8 Pin DIP (Note 2)	660 mW
Input Voltage	±0.4V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Operating Temperature	0°C to +70°C
Junction Temperature	+150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	+300°C

electrical characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Operating Supply Voltage (V_S)		4		12	V
Quiescent Current (I_Q)	$V_S = 6V, V_{IN} = 0$		4	8	mA
Output Power (P_{OUT}) (Note 3)	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$	250	325		mW
	$V_S = 9V, R_L = 16\Omega, THD = 10\%$		500		mW
Voltage Gain (A_V)	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz}$ 10 μF from Pin 1 to 8		26		dB
			46		dB
Bandwidth (BW)	$V_S = 6V, \text{Pins 1 and 8 Open}$		300		kHz
Total Harmonic Distortion (THD)	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, P_{OUT} = 125\text{ mW}$ $f = 1\text{ kHz, Pins 1 and 8 Open}$		0.2		%
Power Supply Rejection Ratio (PSRR)	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz, } C_{BYPASS} = 10\mu\text{F}$ Pins 1 and 8 Open, Referred to Output		50		dB
Input Resistance (R_{IN})			50		k Ω
Input Bias Current (I_{BIAS})	$V_S = 6V, \text{Pins 2 and 3 Open}$		250		nA

Note 1: Parts selected for higher absolute maximum supply voltage available on special request.

Note 2: For operating at elevated temperatures, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 187°C/W junction to ambient.

Note 3: If oscillation exists under some load conditions, add 10 Ω and 0.05 μF series network from pin 5 to ground.

application hints

GAIN CONTROL

To make the LM385 a more versatile amplifier, two pins (1 and 8) are provided for gain control. With pins 1 and 8 open the 1.35 k Ω resistor sets the gain at 20 (26 dB). If a capacitor is put from pin 1 to 8, bypassing the 1.35 k Ω resistor, the gain will go up to 200 (46 dB). If a resistor is placed in series with the capacitor, the gain can be set to any value from 20 to 200. Gain control can also be done by capacitively coupling a resistor (or FET) from pin 1 to ground.

Additional external components can be placed in parallel with the internal feedback resistors to tailor the gain and frequency response for individual applications. For example, we can compensate poor speaker bass response by frequency shaping the feedback path. This is done with a series RC from pin 1 to 5 (paralleling the internal 15 k Ω resistor). For 6 dB effective bass boost: $R \geq 15\text{ k}\Omega$, the lowest value for good stable operation is $R = 40\text{ k}\Omega$ if pin 8 is open. If pins 1 and 8 are bypassed then R as low as 2 k Ω can be used. This restriction is because the amplifier is only compensated for closed-loop gains greater than 9.

INPUT BIASING

The schematic shows that both inputs are biased to ground with a 50 k Ω resistor. The base current of the input transistors is about 250 nA, so the inputs are at about 12.5 mV when left open. If the dc source resistance driving the LM385 is higher than 250 k Ω it will contribute very little additional offset (about 2.5 mV at the input, 50 mV at the output). If the dc source resistance is less than 10 k Ω , then shunting the unused input to ground will keep the offset low (about 2.5 mV at the input, 50 mV at the output). For dc source resistances between these values we can eliminate excess offset by putting a resistor from the unused input to ground, equal in value to the dc source resistance. Of course all offset problems are eliminated if the input is capacitively coupled.

When using the LM385 with higher gains (bypassing the 1.35 k Ω resistor between pins 1 and 8) it is necessary to bypass the unused input, preventing degradation of gain and possible instabilities. This is done with a 0.1 μF capacitor or a short to ground depending on the dc source resistance on the driven input.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปราณี ปฐวีศรีสุธา เกิดเมื่อวันที่ 7 เมษายน 2517 ที่จังหวัดระยอง สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนระยองวิทยาคม จังหวัดระยอง จากนั้นเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จบการศึกษา ในปี การศึกษา 2539

ประวัติการฝึกงาน

ผ่านการฝึกงานที่ โรงแยกก๊าซการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ฝ่ายซ่อมบำรุง จังหวัดระยอง ตั้งแต่วันที่ 3 เมษายน - 18 พฤษภาคม 2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นางสาวทิวารัตน์ บุญเรือง เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน 2516 ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนศรียานุสรณ์ จังหวัดจันทบุรี จากนั้นเข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จบการศึกษา ในปีการศึกษา 2539

ประวัติการฝึกงาน

ผ่านการฝึกงาน ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (ห้องปฏิบัติการ Electro Optics) ลาดกระบัง ระหว่างวันที่ 3 เมษายน - 19 พฤษภาคม 2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้