

การศึกษาการขยายช่วงกว้างความถี่สื่อสารด้วยเทคนิคโคฮีเรนต์



น.ส. พจนมาน ปทุมทิพย์

นาย ภูริวัฒน์ กวนปัญญา

น.ส. วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมึก.....  
เลขทะเบียน... 38538  
วัน, เดือน, ปี... 5 ส.ค. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Study of Coherent Detection for Wider Communication Bandwidth

**Miss. Podjanaman Pathoomtip**

**Mr. Puriwat Cuanpunya**

**Miss. Wandee Petchmaneelumka**

**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**

**1999**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาการขยายช่วงกว้างความถี่สื่อสารด้วยเทคนิค โคฮีเรนซ์

โดย

น.ส. พจนมาน ปทุมทิพย์

นาย ภูริวัจน์ ควนปัญญา

น.ส. วรณดี เพชรมณีล้ำค่า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

(รศ. สุรพล รักวิจัย)

คณะกรรมการ โครงการพิเศษ

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน)

กรรมการ

(ผศ. เกรือวัลย์ ศีตะจิตต์)

กรรมการ

(ผศ. วิชาญ เตชิตธีระ)

กรรมการ

(อ. วิษณุ เพชรภา)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการขยายช่วงกว้างความถี่สื่อสารด้วยเทคนิค โคฮีเรนซ์
โดย	น.ส. พจนมาน ปทุมทิพย์ นาย ภูริวัชต์ กวนปัญญา น.ส. วรณดี เพชรณดีล้ำค่า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2542

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการขยายช่วงกว้างความถี่สื่อสารด้วยเทคนิค โคฮีเรนซ์ ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการใช้สัญญาณความถี่สูงเป็นคลื่นพาห้สัญญาณที่ต้องการผ่านเข้าใยแก้วนำแสง ทำให้สัญญาณที่ต้องการเดินทางภายในใยแก้วนำแสงได้ระยะทางที่ไกลโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ โดยที่สัญญาณความถี่สูงนี้จะถูกรวมเข้ากับสัญญาณการสันเฉพาะที่เพื่อทำการหักล้างความถี่สูงออกก่อนเข้าตัวตรวจจับสัญญาณแสง ทำให้ตัวตรวจจับสัญญาณแสงสามารถรับสัญญาณที่คลื่นพาห้ความถี่สูงหรือแบนด์วิธกว้างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	A Study of Coherent Detection for Wider Communication Bandwidth
<b>Name</b>	Miss. Podjanaman Pathoomtip Mr. Puriwat Cuanpunya Miss. Wandee Petchmaneelumka
<b>Special Project Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin
<b>Department</b>	Applied Physics
<b>Academic Year</b>	1999

### Abstract

This project is a study of optical communication technique for wider communication bandwidth using coherent detection scheme. The principle of the technique is that high frequency signal is modulated as carrier frequency for long distance transmission. High frequency modulated signals are detracted before entering on the detector. Results obtained have shown the potential of using for broadband communication.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบข่ายการทำงาน	1
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
<b>บทที่ 2 คุณสมบัติของใยแก้วนำแสง</b>	3
2.1 ชนิดของใยแก้วนำแสง	3
2.1.1 เส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว	4
2.1.2 เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด	4
2.2 การลดทอน	5
2.2.1 การดูดกลืนของวัสดุ	6
2.2.2 การดูดกลืนจากภายนอก	6
2.2.3 การสะท้อนเรย์ลี	7
2.2.4 การสูญเสียจากการโค้งงอ	7
2.3 การกระจายในใยแก้วนำแสง	10
2.3.1 การกระจายเชิงวัสดุ	11
2.3.2 การกระจายเชิงท่อนำคลื่น	13
2.3.3 การกระจายเชิงโหมด	14
2.4 สัญญาณรบกวน	14
<b>บทที่ 3 ระบบการสื่อสารทางแสง</b>	20
3.1 ระบบพื้นฐาน	20
3.1.1 เครื่องส่ง	20
3.1.2 เครื่องรับ	20
3.1.3 อุปกรณ์ทวนสัญญาณ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4	ใยแก้วนำแสง	21
3.1.5	การมอดูเลชัน การมัลติเพลกซ์ และการเข้ารหัส	21
3.2	การมัลติเพลกซ์	21
3.2.1	การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา	22
3.2.2	การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความถี่	24
3.2.3	การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	26
3.3	การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง	27
3.3.1	การเชื่อมต่อด้วยวิธีการเชิงกล	27
3.3.2	การเชื่อมต่อด้วยวิธีการหลอมรวม	28
3.3.3	การเชื่อมต่อด้วยหัวเชื่อมต่อ	29
3.4	การสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ	30
3.4.1	การผิดพลาดจากพื้นที่แกน	30
3.4.2	ความผิดพลาดเชิงมุม	31
3.4.3	การสูญเสียเฟรสนเอล	31
3.5	คู่ควบใยแก้วนำแสง	32
3.6	ไมโคร – ออปติคอลคัปเปลอร์	37
3.7	การสูญเสียเนื่องจากการคัปปลิง	38
<b>บทที่ 4</b>	<b>ระบบออปติก</b>	<b>39</b>
4.1	หลักการพื้นฐานของระบบออปติกทางแสง	39
4.2	อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	45
4.3	การตรวจจับสัญญาณแบบสเตเทอโรไดนามิก	46
4.4	การตรวจจับสัญญาณแบบ โฮโมไดนามิก	48
4.5	คุณสมบัติของระบบออปติก	48
4.6	องค์ประกอบที่สำคัญในระบบออปติก	49
4.6.1	เลเซอร์	49
4.6.1.1	เลเซอร์สำหรับระบบออปติก	49
4.6.2	ตัวรับสำหรับระบบออปติก	51
4.6.2.1	โฟโตไดโอด	52
<b>บทที่ 5</b>	<b>การออกแบบการทำงานของวงจร</b>	<b>54</b>
5.1	การทำงานของวงจรรหัส	54
5.1.1	วงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2	วงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณทางไฟฟ้า	56
5.2	การทำงานของวงจรถ่ายรับ	57
5.2.1	วงจรถ่ายจับสัญญาณแสง	57
<b>บทที่ 6</b>	<b>ขั้นตอนการดำเนินงาน</b>	58
6.1	การทดลองเบื้องต้น	58
6.2	การทดลองของสัญญาณที่มีการมัลติเพลกซ์	62
<b>บทที่ 7</b>	<b>ผลการทดลอง</b>	64
7.1	ผลการทดลองตอนที่ 1	64
7.2	ผลการทดลองตอนที่ 2	66
7.2.1	สัญญาณทางไฟฟ้า	66
7.2.2	สัญญาณเอาต์พุต	69
<b>บทที่ 8</b>	<b>สรุปผลการทดลอง และแนวการพัฒนา</b>	74
8.1	สรุปผลการทดลอง	74
8.2	แนวทางการพัฒนาการทดลอง	75
<b>เอกสารอ้างอิง</b>		76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนของสารที่ความยาวคลื่น และที่สารชนิดต่างๆ	7
ตารางที่ 7.1 แสดงผลการทดลอง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆที่ตัวตรวจจับแสง ตรวจจับได้	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) แสดงการวางตัวของใยแก้วในการเชื่อมต่อ	30
รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะต่างๆของการวางตัวของใยแก้วนำแสง	31
รูปที่ 3.11 คัปเปิลเลอร์ทางแสงชนิด 3 พอร์ต หรือ $1 \times 2$ พอร์ต	32
รูปที่ 3.12 แสดงคัปเปิลเลอร์ $2 \times 2$ และวิธีการผลิต	32
รูปที่ 3.13 คัปเปิลเลอร์แสง $N \times M$	33
รูปที่ 3.14 แสดงคัปเปิลเลอร์วาย (Y coupler) หรือตัวแยกแสง	33
รูปที่ 3.15 แสดงตัวรวมแสง	34
รูปที่ 3.16 แสดงคัปเปิลเลอร์เอ็กซ์ (X coupler)	34
รูปที่ 3.17 แสดงคัปเปิลเลอร์ดาว (Star coupler)	34
รูปที่ 3.18 แสดงคัปเปิลเลอร์ต้นไม้ (Tree coupler) $1 \times M$	35
รูปที่ 3.19 แสดงฟลักซ์พลังงานที่เข้าไปและออกจากคัปเปิลเลอร์แสง	35
รูปที่ 3.20 คัปเปิลเลอร์ระหว่างพอร์ตทางเข้า 2 พอร์ต	36
รูปที่ 3.21 แสดงรูปแบบลำแสงขนานของคัปเปิลเลอร์เอ็กซ์ เมื่อ L เป็นเลนส์รวมแสงและ M เป็นกระจกสะท้อน	37
รูปที่ 3.22 แสดงการคัปเปิลเลอร์เอ็กซ์ไมโคร - ออปติคอล	38
รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ IM-DD (Intensity – modulation direct detection)	39
รูปที่ 4.2 หลักการของการรับแบบแสงออปติคัล	40
รูปที่ 4.3 ระบบออปติคัลทั่วไป	40
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นพาหะมอดูเลตที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลฐานสอง	41
รูปที่ 4.5 การผสมกันของคลื่นแสง $E_s$ และ $E_{10}$ a) คลื่น 2 คลื่น $E_s$ และ $E_{10}$ b) $E_s + E_{10}$	41
c) กระแสโฟโตไดโอด	44
รูปที่ 4.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบออปติคัล	45
รูปที่ 4.7 แสดงไดอะแกรมของการตรวจจับแบบเฮตเทอโรไดนามิก	47
รูปที่ 4.8 แสดงไดอะแกรมของการตรวจจับแบบโฮโมไดนามิก	48
รูปที่ 4.9 แสดงกระบวนการพื้นฐาน 3 กระบวนการของการเปลี่ยนระดับพลังงานระหว่าง 2 ระดับ พลังงาน $E_1$ และ $E_2$ จุดสีดำแสดงถึงสถานะของอะตอม	50
สถานะเริ่มต้นจะอยู่ทางด้านซ้าย : สถานะสุดท้ายหลังจากกระบวนการเกิดขึ้นจะอยู่ทางด้านขวา (a) การดูดซับ (b) การปล่อยรังสีแบบเกิดขึ้นเอง	
(c) การปล่อยรังสีแบบกระตุ้น	50
รูปที่ 4.10 แสดงการปล่อยรังสีของสนามระยะไกลของเลเซอร์โครงสร้างวิวิธพันธ์คู่	51
รูปที่ 4.11 กราฟ I-V ของโฟโตไดโอด ภายใต้การฉายแสง และสถานะที่ยังไม่ฉายแสง	53
รูปที่ 5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 วงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณทางไฟฟ้า	56
รูปที่ 5.3 วงจรตรวจจับสัญญาณแสง	57
รูปที่ 6.1 อุปกรณ์การมัลติเพลกซ์	58
รูปที่ 6.2 อุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณเข้าเลเซอร์	59
รูปที่ 6.3 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจากใยแก้วนำแสง	59
รูปที่ 6.4 ใยแก้วนำแสงระยะทางประมาณ 1.5 กิโลเมตร	60
รูปที่ 6.5 ภาพรอยต่อระหว่างใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์คัปเปิลเลอร์	60
รูปที่ 6.6 แสดงการยิงสัญญาณจากเลเซอร์แสงสีแดงเข้าใยแก้วนำแสง	61
รูปที่ 6.7 แสดงการยิงสัญญาณจากเลเซอร์อินฟราเรดเข้าใยแก้วนำแสง	61
รูปที่ 6.8 แสดงการตรวจจับสัญญาณแสงจากใยแก้วนำแสง	62
รูปที่ 6.9 การจัดอุปกรณ์ทั้งภาครับและภาคส่ง	63
รูปที่ 6.10 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการสื่อสารโดยเทคนิคออปติคัล	63
รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ	64
รูปที่ 7.2 สัญญาณความถี่ 10 kHz กับ 12 kHz ที่จะมอดูเลตเข้ากับเลเซอร์แสงสีแดง และเลเซอร์อินฟราเรด	65
รูปที่ 7.3 การรวมกันของสัญญาณความถี่ 10 kHz กับ 12 kHz	65
รูปที่ 7.4 สัญญาณนาฬิกาสำหรับการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา	66
รูปที่ 7.5 สัญญาณอินพุตช่องที่ 1 ก่อนทำการมัลติเพลกซ์	66
รูปที่ 7.6 สัญญาณอินพุตช่องที่ 2 ก่อนทำการมัลติเพลกซ์	67
รูปที่ 7.7 สัญญาณมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา	67
รูปที่ 7.8 ภาพขยายสัญญาณมัลติเพลกซ์	68
รูปที่ 7.9 ภาพขยายของรูปที่ 7.8	68
รูปที่ 7.10 ภาพสัญญาณรบกวนที่วัดได้จากตัวตรวจจับสัญญาณแสง	69
รูปที่ 7.11 สัญญาณกระแสตรงที่ตรวจจับจากเลเซอร์แสงสีแดง	69
รูปที่ 7.12 สัญญาณกระแสตรงที่ตรวจจับจากเลเซอร์อินฟราเรด	70
รูปที่ 7.13 สัญญาณมัลติเพลกซ์ที่ได้จากเลเซอร์แสงสีแดง	70
รูปที่ 7.14 ภาพขยายของสัญญาณมัลติเพลกซ์ในส่วนของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม	71
รูปที่ 7.15 ภาพขยายของสัญญาณมัลติเพลกซ์ในส่วนของสัญญาณรูปไซน์	71
รูปที่ 7.16 สัญญาณจากตัวสันเฉพาที่	72
รูปที่ 7.17 สัญญาณรวมระหว่างสัญญาณมัลติเพลกซ์กับตัวสันเฉพาที่	72
รูปที่ 7.18 แสดงการขยายสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ถูกหักแล้ว	73
รูปที่ 7.19 แสดงภาพรวมของสัญญาณในรูปที่ 7.17	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพของการรับสัญญาณแสง อาจทำได้โดยการใช้วิธีการตรวจจับแบบอาพันธ์ (Coherent detection) ซึ่งจะหมายถึงวิธีการตรวจจับแบบเฮเทอโรไดน์ (Heterodyne) และโฮโมไดน์ (Homodyne) สำหรับสัญญาณทางแสง โดยจะแตกต่างกันจากการตรวจจับโดยตรงที่เปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นเอาต์พุตทางไฟฟ้าที่ตีโมดูเลต ส่วนในการรับแบบอาพันธ์ทางแสงนั้นจะเพิ่มส่วนที่กำเนิดคลื่นแสงท้องถิ่น (Locally generated optical wave) เข้าไปก่อนที่จะทำการตรวจจับ

การตรวจจับแบบอาพันธ์ จะมีข้อดีดังต่อไปนี้

- เพิ่มระยะทางระหว่างตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ในระบบการส่งสัญญาณ
- มีอัตราการใช้สัญญาณสูงกว่า (เพิ่มแบนด์วิดท์)
- เพิ่มกำลังเพื่อชดเชยสำหรับการสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์การคัปเปิลอร์ (Coupler) และการมัลติเพลกซ์ (Multiplex) และการดีมัลติเพลกซ์ (Demultiplex) ทางแสง
- เพิ่มความจุของสัญญาณด้วยการมัลติเพลกซ์ทางแสง

### ที่มาของโครงการ

การส่งสัญญาณที่ความถี่ต่ำในใยแก้วนำแสงจะทำให้ส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่ไม่ไกลนัก แต่ในปัจจุบันการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงจะใช้ในระยะทางที่ไกลมาก จึงทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณจำนวนมากซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองหรือถ้าไม่ใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ จะเกิดการสูญหายของสัญญาณภายในใยแก้วนำแสงได้มาก จึงได้มีการศึกษาเทคนิคการตรวจจับแบบอาพันธ์เพื่อทำให้สัญญาณผ่านใยแก้วนำแสงได้ในระยะทางที่ไกลโดยมีการสูญเสียของสัญญาณน้อยที่สุด และเป็นการประหยัดอุปกรณ์ทวนสัญญาณ เนื่องจากเทคนิคนี้ใช้ความถี่สูงเป็นตัวพาให้สัญญาณทำให้สัญญาณไปได้ไกลขึ้น

### 1.1 วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อศึกษาหลักการของระบบการสื่อสารด้วยแสง
- 2 เพื่อศึกษาระบบการสื่อสารด้วยแสงแบบอาพันธ์ (Coherent lightwave communication)
- 3 เพื่อศึกษาข้อได้เปรียบของการใช้ระบบการสื่อสารแบบอาพันธ์
- 4 จำลองระบบการสื่อสารแบบอาพันธ์
- 5 เพื่อศึกษาการสูญเสียของสัญญาณในระบบการสื่อสารแบบอาพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ขอบข่ายการทำงาน

- 1 สร้างระบบการสื่อสารแบบอาพันธ์
- 2 ทดสอบระบบที่ทำการทดลอง
- 3 สังเกตรูปแบบของสัญญาณที่ส่งเข้าและออกจากเส้นใยแก้ว
- 4 ศึกษาถึงปริมาณสัญญาณที่สูญเสียไปเนื่องจากการส่งสัญญาณแบบอาพันธ์

## 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1 สามารถนำไปใช้เป็นชุดทดลองสำหรับการศึกษา
- 2 นำไปใช้ในการพัฒนาการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
- 3 ทำให้ทราบถึงองค์ประกอบต่างๆที่มีในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง
- 4 สามารถนำไปใช้กับการสื่อสารระยะไกลที่มีแบนด์วิธกว้างได้
- 5 เทคนิคต่างๆในระบบการสื่อสารด้วยแสง เช่น การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงและการปล่อย (Launch) แสงเข้าไปยังเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียว

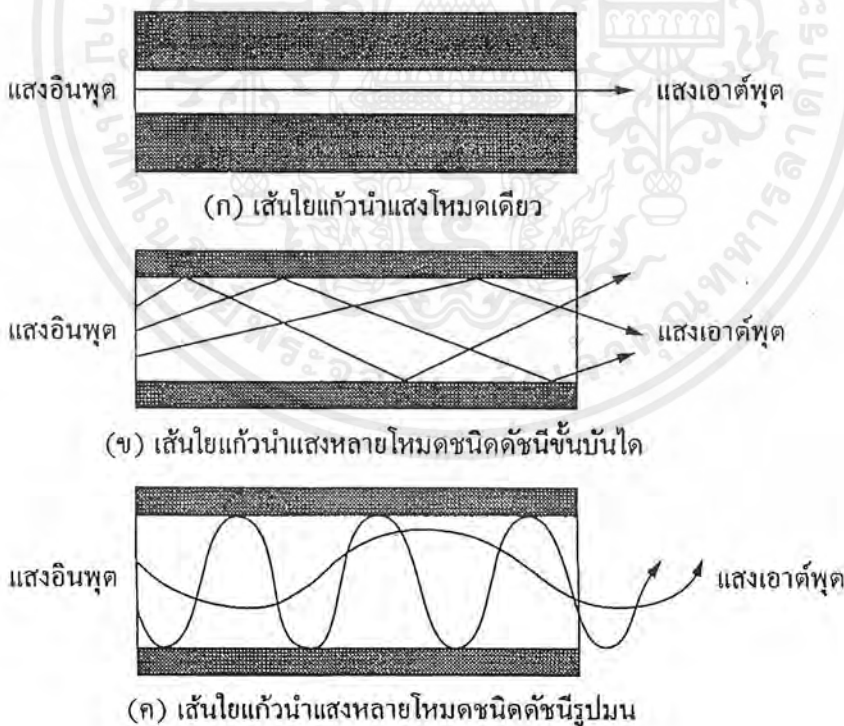
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### คุณสมบัติของใยแก้วนำแสง

#### 2.1 ชนิดของใยแก้วนำแสง

ภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เดินทางหรือเกิดขึ้นจะเป็นตัวบอกโหมดของแสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้วนำแสงนั้น กล่าวคือถ้าแนวลำแสงอยู่แนวเดียวเรียกว่าเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว (Single Mode Fiber) แต่ถ้าภายในเส้นใยแก้วนำแสงมีแนวลำแสงอยู่เป็นจำนวนมาก เรียกว่า เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multimode Fiber) ดังรูปที่ 2.1 นอกจากการแบ่งชนิดใยแก้วนำแสงตามลักษณะของโหมดแล้วก็ยังมีวิธีอื่นที่แบ่งได้ โดยดูจากวัสดุที่ทำ เช่น เส้นใยที่ทำจากแก้ว พลาสติก หรือโพลีเมอร์ และยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะรูปร่าง ลักษณะของดัชนีหักเห เช่น ใยแก้วชนิดดัชนีขั้นบันได (Step Index) หรือดัชนีรูปมน (Graded Index) เป็นต้น

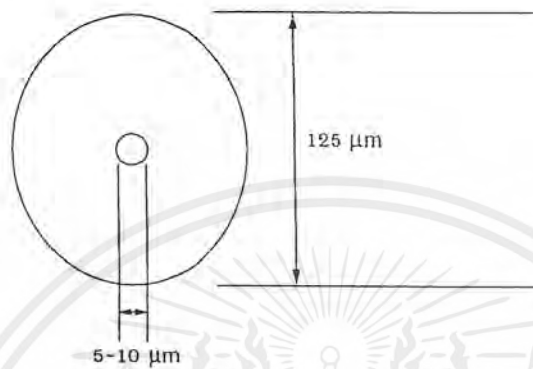


รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในของเส้นใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 เส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียว

เส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนและแคลดประมาณ 5-10 และ 125 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งส่วนของแกนมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคมาก และให้แสงออกมาเพียงโหมคเดียว ลักษณะหน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียวแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

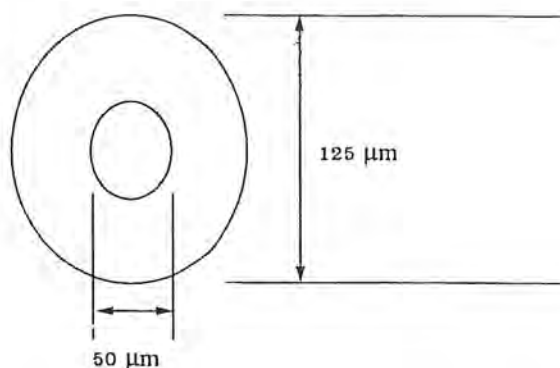


รูปที่ 2.2 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงโหมคเดียว

พิจารณาจากรูปจะเห็นว่าขนาดของแกนที่ใช้ส่งสัญญาณนั้นเล็กมากซึ่งทำให้การนำแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วยากกว่าใยแก้วนำแสงหลายโหมคแสง แต่เนื่องจากข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียวคือ การแตกกระจายของสัญญาณเกิดขึ้นน้อยกว่าใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคทำให้มีแบนด์วิธที่ใช้ประโยชน์ได้กว้างกว่า

### 2.1.2 เส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมค

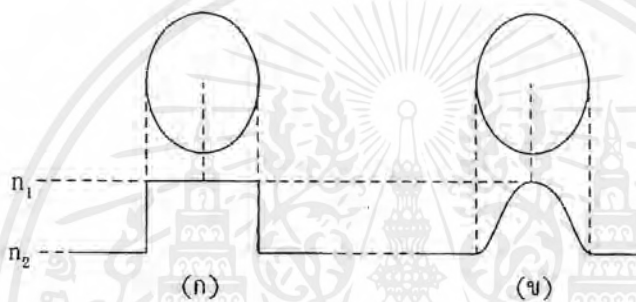
โครงสร้างภายในของเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งประกอบด้วยแกนและแคลด (Cladding) สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมคส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนและแคลด (Cladding) โดยประมาณ 50 ไมครอน และ 125 ไมครอน ตามลำดับซึ่งมีลักษณะหน้าตัดดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแกนของเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดนั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแสงที่ตกกระทบบที่ปลายอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงมีมุมตกกระทบบที่แตกต่างกันหลายค่า จากหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงที่เกิดขึ้นภายในส่วนของแกนทำให้มีแนวลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด และแสงแต่ละโหมดเดินทางโดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันอันเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกกระจายของโหมดแสง (Mode Dispersion) หรือของสัญญาณที่รับได้เนื่องจากความแตกต่างของเวลา จึงได้มีการพัฒนาที่จะลดการแตกกระจายของสัญญาณ ซึ่งเกิดขึ้นจากเส้นใยแก้วนำแสงหลายโหมดด้วยการปรับปรุงลักษณะดัชนีการหักเหของแกนดังรูปที่ 2.4



- (ก) ลักษณะดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อมีลักษณะเป็นขั้นบันได  
 (ข) การกระจายของสัญญาณเมื่อดัชนีหักเหภายในแกนมีค่าค่อย ๆ เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 2.4 แสดงชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงตามลักษณะของดัชนีหักเหของแกน

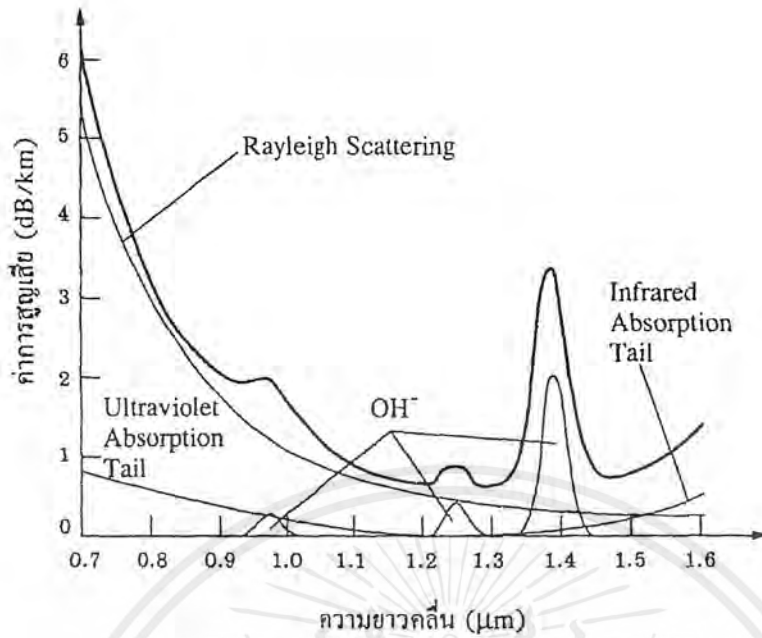
## 2.2 การลดทอน

กำลังของแหล่งกำเนิดแสง ( $P_0$ ) ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงยาว  $L$  กิโลเมตร แล้วกำลังของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วนำแสง ( $P_i$ ) เมื่อพิจารณาที่  $P_0 < P_i$  โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอน (Attenuation Coefficient,  $\alpha$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร ซึ่งแทนด้วยความสัมพันธ์คือ

$$\alpha L = -10 \log \frac{P_0}{P_i} \quad (2.1)$$

เมื่อการลดทอนกำลังของแสงในใยแก้วนำแสงนั้น มีผลมาจากการดูดกลืนแสงของในส่วนของแกน หรือแคลค การสะท้อนของรังสีของแสง และการโค้งงอของใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการลดทอนของแสงในใยแก้วนำแสงสัมพันธ์กับความยาวคลื่น

การลดทอนของแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงมีสาเหตุมาจาก

### 2.2.1 การดูดกลืนของวัสดุ

พิจารณาการดูดกลืนในแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์ จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์จะดูดกลืนแสงน้อย และจะเห็นว่าอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นระหว่าง 0.8 ถึง 1.6 ไมครอน จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวถูกเลือกเพื่อใช้งานทางด้านสื่อสาร การดูดกลืนแบบนี้จะมีค่ามากบริเวณความยาวคลื่นในช่วงของอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) และอินฟราเรด (Infrared, IR)

### 2.2.2 การดูดกลืนจากภายนอก

การลดทอนของแสงที่เกิดจากการดูดกลืนแสงนี้เกิดจากการที่สารที่ใช้ผลิตเส้นใยแก้วนำแสงหรือแก้วนั้นมีสารเจือปนอยู่ทำให้เกิดการดูดกลืนของแสงขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะมีการดูดแสงอันเนื่องมาจากแก้วและสารเจือปน ตัวอย่างเช่น กรณีที่มีสารเจือปนอยู่ 1 ในล้านส่วนก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่มีค่าดังตารางที่ 2.1

เทคนิคการผลิตใยแก้วนำแสงสมัยใหม่นั้นสามารถลดอ็อกซิเจนของสารเจือปนพวกนี้ได้จนถึงระดับที่ไม่มีผลต่อการดูดกลืนได้ อย่างไรก็ตามอ็อกซิเจนดูดกลืนตัวหนึ่งที่ไม่สามารถขจัดได้ก็คือ ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, OH) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ก) จุดยอดของการสั่นพื้นฐานของอ็อกซิเจนไฮดรอกซิลจะเกิดที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 2.27 ไมครอน และพื้นฐานการสั่นที่ 2.2 ไมครอน ซึ่งการสั่นพื้นฐานนี้จะทำให้เกิดโอเวอร์โทน (Overtone) ที่ฮาร์โมนิกต่างๆ ดังนี้ 1.38, 0.95 และ 0.72 ไมครอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อรวมระหว่างการสั่นพื้นฐานและโอเวอร์โทนจะได้จุดยอดที่ 1.24 ,1.13 และ 0.88 ไมครอนตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 การสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนของสารที่ความยาวคลื่นและที่สารชนิดต่างๆ

สารเจือปน	ความยาวคลื่น (nm)	ค่าการสูญเสีย (dB/km)
Cr <sup>3+</sup>	625	1.6
C <sup>2+</sup>	685	0.1
Cu <sup>2+</sup>	850	1.1
Fe <sup>2+</sup>	1100	0.68
Fe <sup>3+</sup>	400	0.15
Ni <sup>2+</sup>	650	0.1
Mn <sup>3+</sup>	460	0.2

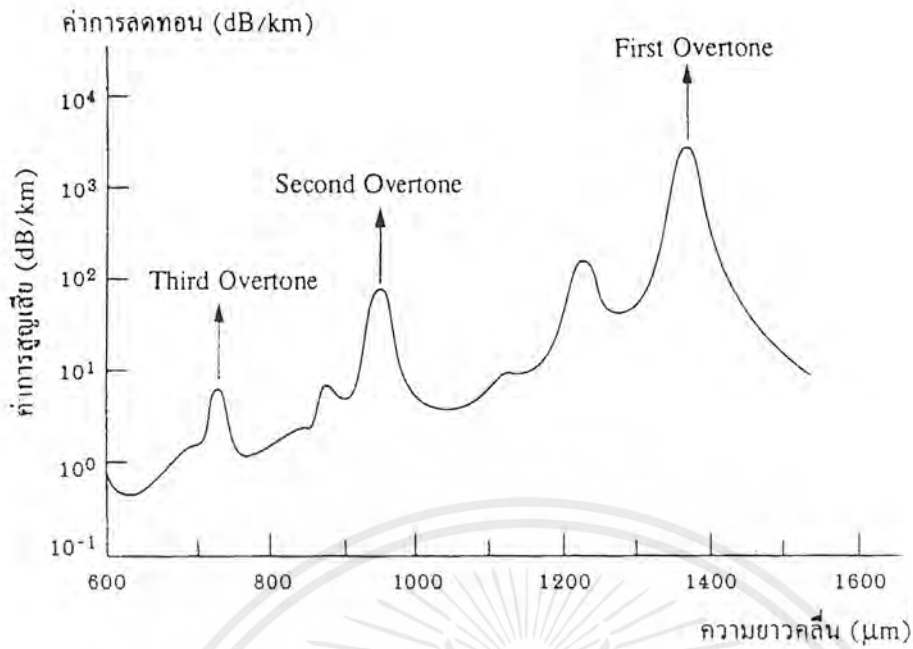
### 2.2.3 การสะท้อนเรย์ลี

การดูดกลืนของใยแก้วนำแสงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งขึ้นอยู่กับการสะท้อนของแสงที่เกิดจากใยแก้วนำแสงมีค่าดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โคนค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนชนิดเรย์ลี (Rayleigh ,  $\alpha_R$ ) จะเท่ากับ  $1/\lambda^4$  ของค่าการสูญเสียของกำลังแสงที่เกิดจากการสะท้อนเรย์ลีดังแสดงในรูปที่ 2.6 ก)

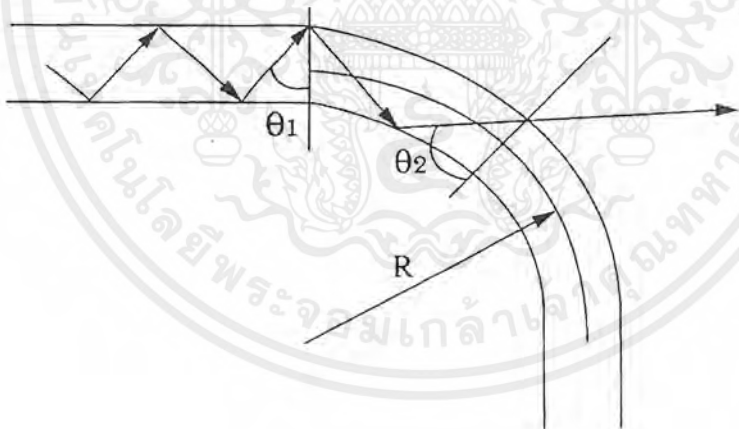
### 2.2.4 การสูญเสียจากการโค้งงอ

การสูญเสียแบบโค้งงอ (Bending Loss) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ กรโค้งงอชนิดมหภาคหรือแมคโครเบนด (Macrobend) ที่มีรัศมีการโค้งงอมากกว่า 10 มิลลิเมตร และการโค้งงอชนิดจุลภาคหรือไมโครเบนด (Microbend) ที่มีรัศมีของส่วนโค้งน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร

การโค้งงอชนิดแมคโครเบนดจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วม้วนอยู่รอบหลอดม้วน เนื่องมาจากการถูกโค้งงอตามมุมต่างๆ การเกิดการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอแบบนี้รังสีของแสงที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วตรงบริเวณที่โค้งงอ ซึ่งทำให้แสงตกกระทบตรงรอยต่อระหว่างแกน และแคลด ที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต จึงทำให้รังสีของแสงกระจายออกไปนอกเส้นใยแก้วดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข)



รูปที่ 2.6 ก) แสดงการดูดกลืนจากไฮดรอกซิล



$\theta_1$  และ  $\theta_2$  คือมุมตกกระทบของลำแสงภายในใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2.6 ข) แสดงการเดินทางของแสงในใยแก้วนำแสงที่โค้งงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการสูญเสียจากไมโครเบนด์ คือ

$$L_f = N \langle h^2 \rangle \frac{a^4}{D^6 \lambda^3} \left( \frac{E_b}{E_f} \right)^2 \quad (2.2)$$

$N$  คือ จำนวน โค้งของการโค้งงอต่อความยาว

$h$  คือ ส่วนสูงเฉลี่ยของเคเบิลที่โค้งงอ

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเคเบิลใยแก้วนำแสง

$a$  คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

$E_b$  คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของใยแก้ว

$E_f$  คือ ค่าอิลาสติกโมดูลัสของเคเบิล

พิจารณาค่าการสูญเสียจากเมคโครเบนด์ แปรผันกับ  $\exp(-R/R_c)$

$R$  คือ รัศมีของการโค้งงอ

เมื่อ  $R_c = a/(NA)^2$

$a$  คือ รัศมีของแกนใยแก้ว

$NA$  คือ นิวเมอร์คัลลอปเปอร์เจอร์

การสูญเสียของกำลังแสงจะมีค่าต่ำสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ และถ้าผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างแกนและแคลดมีค่ามากก็จะทำให้การสูญเสียมีค่าสูง เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวที่ทำงานที่ความยาวคลื่นยาวๆ จะไวต่อการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอ และเส้นใยแก้วที่ถูกพันอยู่รอบแกนมีรัศมี 10 เซนติเมตรซึ่งนับว่าสั้นนั้นก็ยังสามารถแก้ไขได้โดยการตัดใยแก้วนำแสงส่วนที่โค้งงอทิ้งไปได้ การโค้งงอชนิดไมโครเบนด์เกิดจากการความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างทางเรขาคณิตของเส้นใยแก้วนำแสงในกระบวนการผลิต เช่นรัศมีของแกน จุดต่อระหว่างแกน และแคอดที่ขรุขระ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต นอกจากนั้นการที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วนำแสงไม่เท่ากันตลอดทั้งเส้นก็ทำให้มีแสงบางส่วนกระจายออกมาจากใยแก้วนำแสงได้เช่นกัน

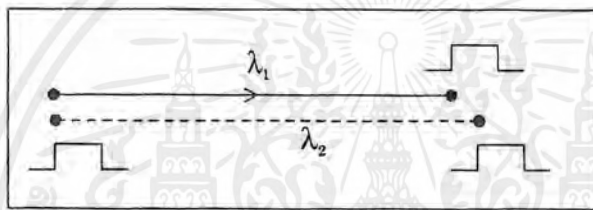
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การกระจายในใยแก้วนำแสง

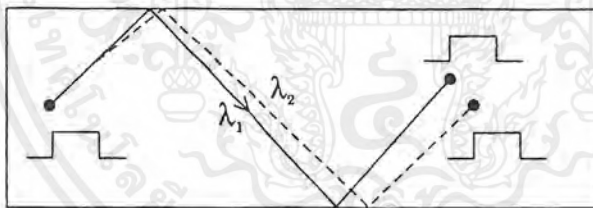
ขณะที่คลื่นแสงเดินทางไปตามเส้นใยแก้วนั้น คลื่นแต่ละแบบจะขยายกว้างออกและทับกันกับคลื่นที่อยู่ใกล้เคียงทำให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นที่เอาต์พุต การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิดการกระจายของคลื่น (Dispersion) ดังรูปที่ 2.7

กลไกที่ทำให้เกิดการกระจายมี 3 ชนิด คือ

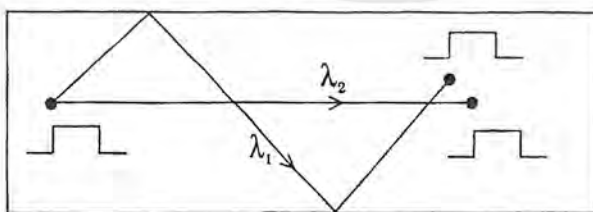
- การกระจายเชิงวัสดุ (Material Dispersion)
- การกระจายของท่อนำคลื่น (Waveguide Dispersion)
- การกระจายเชิงโหมด (Mode Dispersion)



(ก) การกระจายเชิงวัสดุ



(ข) การกระจายของท่อนำคลื่น



(ค) การกระจายเชิงโหมด

รูป 2.7 แสดงการเกิดการกระจายของคลื่นสัญญาณแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

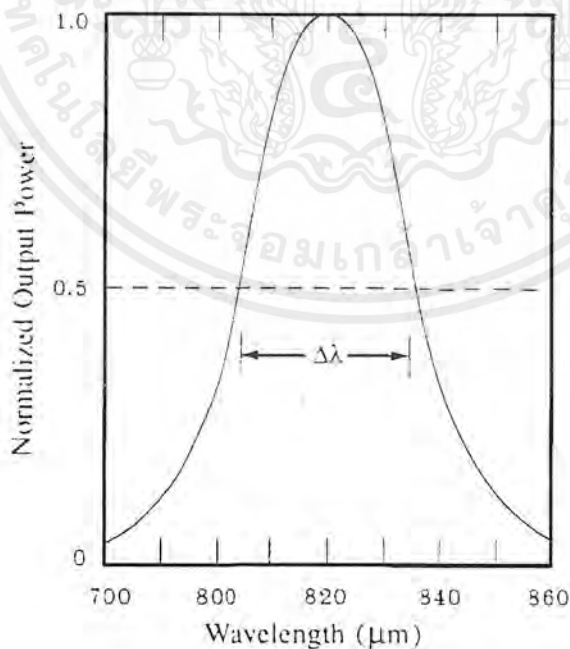
### 2.3.1 การกระจายเชิงวัสดุ

การกระจายแบบนี้เกิดจากดัชนีหักเหของซิลิกาที่ทำใยแก้วนำแสงเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางผ่าน จึงทำให้ความเร็วของแสงในซิลิกาเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น ในขณะที่เดียวกันแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงเช่น LED (Light emitted diode) หรือ LD (Laser diode) จะมีความยาวคลื่นไม่คงที่เพียงความยาวคลื่นเดียวจึงทำให้แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงมีความกว้างของสเปกตรัมขึ้น ดังรูปที่ 2.8

ดังนั้นคลื่นที่เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะมีความเร็วในซิลิกาที่แตกต่างกัน นั่นคือคลื่นที่เกิดจากแสงคนละความยาวคลื่นจะถึงปลายทางต่างเวลากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ความกว้างของคลื่น  $\Delta\tau$  ที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความยาว (L) สามารถหาได้จากสมการ

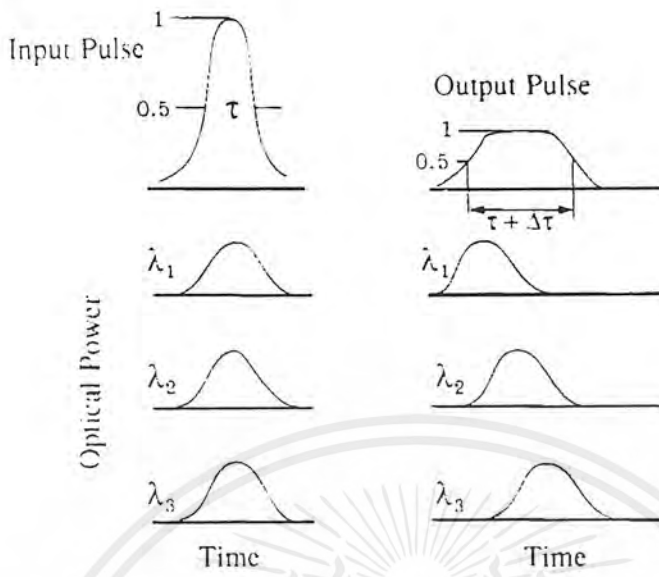
$$\begin{aligned} \frac{\Delta\tau}{L} &= \frac{\lambda}{c} n\Delta\lambda \\ &= -M\Delta\lambda \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง  $c$  คือความเร็วแสงในสุญญากาศ  $n$  คือค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ทำใยแก้ว  $M$  คือค่าการกระจายเชิงวัสดุ และ  $\Delta\lambda$  คือความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง โดยที่ค่า  $M$  จะมีค่าสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.10

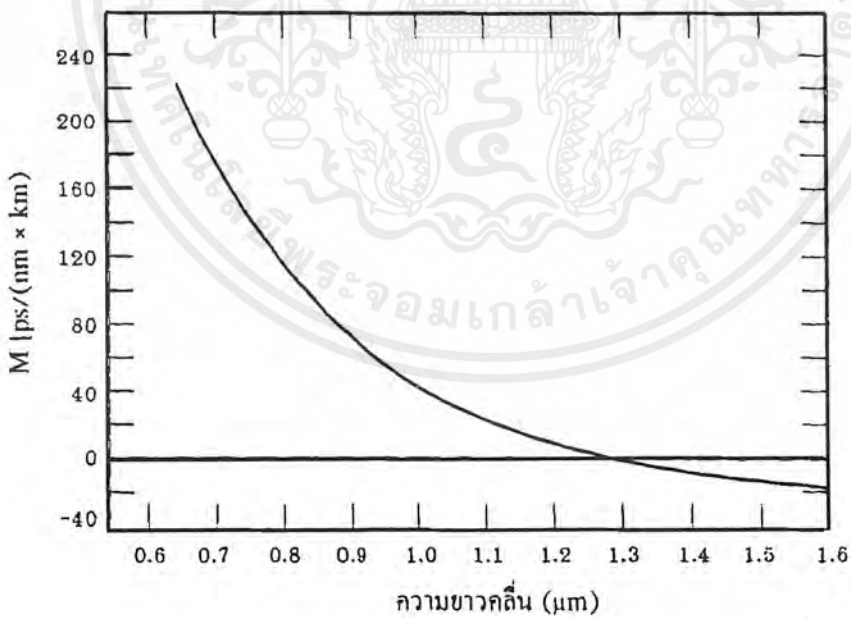


รูปที่ 2.8 แสดงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การเกิดการกระจายของคลื่น

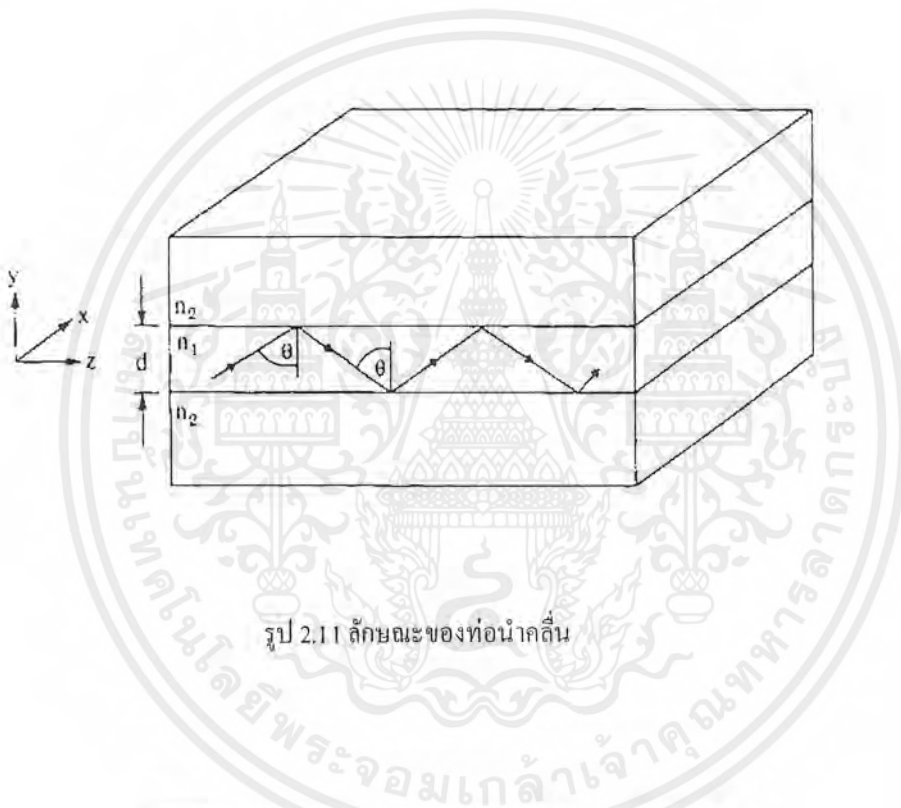


รูปที่ 2.10 การเกิดการกระจายเชิงวัสดุ

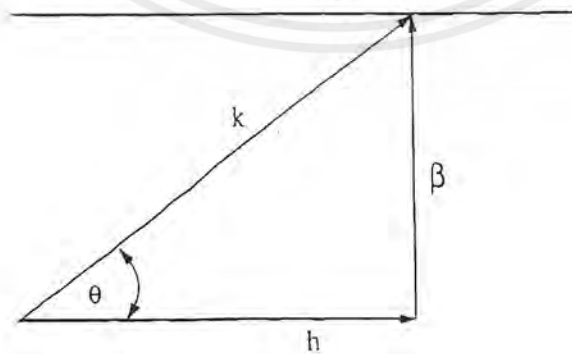
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การกระจายท่อนำคลื่น

การกระจายแบบนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นเช่นเดียวกับการกระจายเชิงวัสดุ เพื่อให้เข้าใจการกระจายแบบนี้จะต้องกล่าวถึงทางเดินแสงโหมดต่างๆในท่อนำคลื่น โดยการสมมติว่าท่อนำคลื่นที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านชั้นกลางที่มีดัชนีหักเห  $n_1$  ซึ่งชั้นนี้จะบางมากและมีความหนาเท่ากับ  $d$  โดยชั้นที่อยู่บนและล่างจะมีค่าดัชนีหักเห  $n_2$  และ  $n_3$  ตามลำดับกรณีนี้  $n_2 = n_3$  เรียกว่าเป็นโครงสร้างที่สมมาตร ถ้าให้  $k$  เป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ (Propagation Factor) ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n_1$  โดยที่  $k$  จะมีค่าเป็น  $k = k_0 n_1$  เมื่อ  $k$  เป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ในอากาศ



รูป 2.11 ลักษณะของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.12 มุมตกกระทบและทางเดินของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าแสงเดินทางทำมุมตกกระทบ  $\theta$  ดังรูปที่ 2.12 ก็จะสามารถกระจายทางเดินของแสงให้อยู่ในแนวตรงได้ และถ้าให้  $\beta$  เป็นแฟกเตอร์ของการแพร่ในแนวตรงซึ่งทำให้ได้ว่า

$$\beta = k \sin \theta = k_0 n_1 \sin \theta \quad (2.4)$$

และ  $h = k \cos \theta$

ในที่นี้  $\beta$  เรียกว่าแฟกเตอร์ของการแพร่ตามยาว (Longitudinal) และให้  $n_{eff}$  คือดัชนีแอฟเฟกทีฟ (Effective Refractive Index) ซึ่งเท่ากับ  $n_1 \sin \theta$  โดยที่  $n_{eff}$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดโหมดต่างๆในการเคลื่อนที่ของแสง เมื่อค่า  $\theta$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $\theta_c$  และ  $90^\circ$  ดังนั้น  $n_{eff}$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $n_2$  และ  $n_1$

### 2.3.3 การกระจายเชิงโหนด

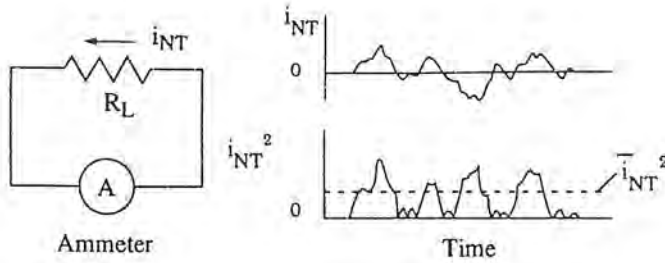
การกระจายของโหนด โหนดที่เคลื่อนที่ในเส้นใยแก้วจะมีอยู่หลายโหนด จึงใช้ระยะเวลาในการเดินทางไปยังปลายทางไม่เท่ากัน โดยในแต่ละโหนดจะทำให้ความกว้างของคลื่นขยายออกเช่นเดียวกัน การกระจายแบบนี้ไม่ขึ้นกับความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง การกระจายแบบนี้จะเกิดขึ้นมากในใยแก้วแบบหลายโหนด ส่วนในใยแก้วแบบโหนดเดียวจะไม่มีกระจายแบบนี้เพราะใยแก้วโหนดเดียวจะมีเพียงโหนดเดียวที่เคลื่อนไปในใยแก้วเท่านั้น

## 2.4 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน เป็นตัวแปรที่เป็นสาเหตุให้สัญญาณมีคุณภาพด้อยลง ซึ่งในส่วนนี้จะได้มีการกล่าวถึงสัญญาณรบกวน และสาเหตุที่สำคัญที่เกิดขึ้นได้ในระบบ ดังเช่น เทอร์มัลนอยส์ (Thermal Noise) และช็อตนอยส์ (Shot noise) เป็นสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อคุณภาพของสัญญาณเป็นอย่างมากดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

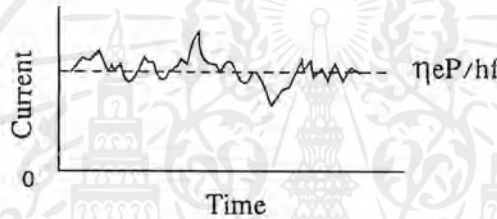
เทอร์มัลนอยส์หรือที่บางครั้งจะเรียกว่าจอห์นสันนอยส์ (Johnson noise) มีสาเหตุมาจากตัวต้านทาน  $R_L$  ที่ใช้ในวงจรของอุปกรณ์รับแสง โดยเกิดขึ้นมาจากอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ภายในตัวต้านทานมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาเนื่องมาจากพลังงานความร้อน ซึ่งตามทฤษฎีทางฟิสิกส์อิเล็กตรอนและอนุภาคใดๆก็ตามจะหยุดการเคลื่อนที่ ที่อุณหภูมิ  $-273^\circ\text{C}$  อิเล็กตรอนดังกล่าวมีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่ไม่แน่นอน ซึ่งถ้านำแอมมิเตอร์ที่มีค่าความไวสูงๆ มาวัดกระแสอาจจะพบค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ตามรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.13 แสดงลักษณะของเทอร์มิสเตอร์

ซึ่งกำลังของเทอร์มิสเตอร์นี้สามารถที่จะหาได้จาก  $R_L i_{NT}^2$  ตามแกนตั้ง โดยที่  $i_{NT}^2$  ตามแกนนอนคือกำลังเฉลี่ยของกระแสเทอร์มิสเตอร์



รูป 2.14 แสดงผลของเทอร์มิสเตอร์ของอุปกรณ์รับสัญญาณ

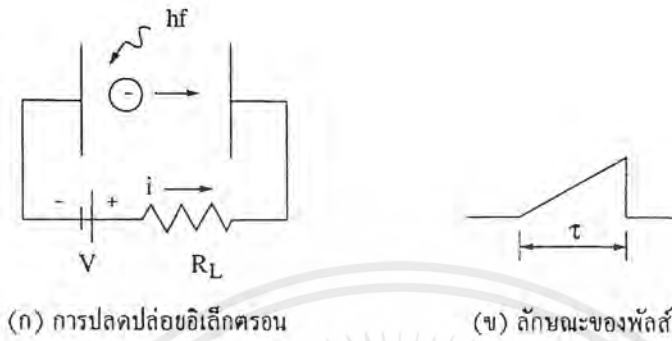
รูป 2.14 แสดงถึงผลของกระแสเทอร์มิสเตอร์ที่มีต่อสัญญาณ ซึ่งสังเกตได้ว่าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงรอบๆค่า  $\eta eP/hf$  ซึ่งเป็นค่ากระแสซึ่งได้จากอุปกรณ์รับแสง โดยที่ค่า  $\eta$  คือประสิทธิภาพควอนตัม  $e$  คือค่าประจุอิเล็กตรอน  $h$  ค่าคงที่พลังค์ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าถึงขนาดของสัญญาณมีค่าน้อย กระแสเทอร์มิสเตอร์ก็จะมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ขนาดของกระแสเทอร์มิสเตอร์ ( $i_{NT}$ ) สามารถที่จะหาได้จากสมการ

$$i_{NT}^2 = 4kT\Delta f / R_L \quad (2.5)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzmann)  $T$  คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน  $\Delta f$  คือแบนด์วิธของอุปกรณ์รับแสง และ  $R_L$  คือความต้านทานโหลด จากสมการ (2.5) จะเห็นว่านอกจากอุณหภูมิแล้ว แบนด์วิธของสัญญาณก็มีผลต่อขนาดของกระแสเทอร์มิสเตอร์ด้วย

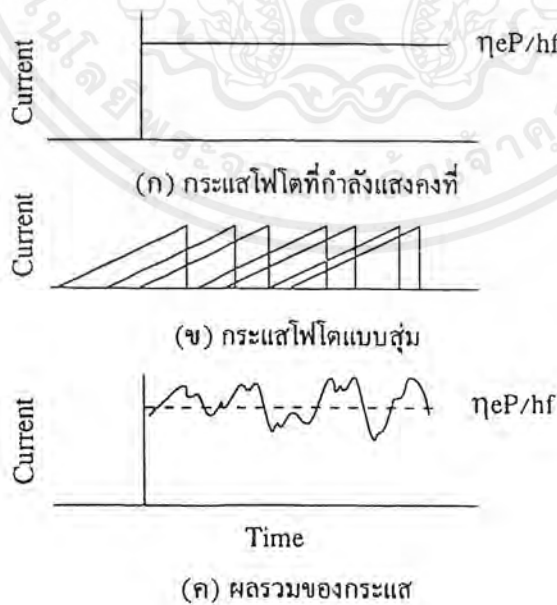
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช็อคตอยส์เกิดจากการที่อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาค และเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แต่ครั้งผ่านขั้วอิเล็กโทรดหรือผ่านรอยต่อ (Junction) ของอุปกรณ์รับแสงก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นซึ่งเราเรียกสัญญาณรบกวนนี้ว่าช็อคตอยส์



รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของแวกคัมโฟโต้ไดโอด

รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของแวกคัมโฟโต้ไดโอด เมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบบนคาโทด และทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนวิ่งไปยังแอโนด ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไหลขึ้นในวงจรภายนอก นอกจากนี้ในรูปยังแสดงถึงคลื่นจำนวนหนึ่งลูกซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดโฟโตอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ดังนั้นถ้าโฟตอนมาตกกระทบบนขั้วคาโทดอย่างต่อเนื่อง และอุปกรณ์รับแสงมีประสิทธิภาพควอนตัม 100 % กระแสที่เกิดขึ้นก็ควรสังเกตได้เป็นค่าคงที่



รูปที่ 2.16 แสดงการเกิดช็อคตอยส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงถึงแม้กำลังของแสงจะมีค่าคงที่ แต่โอกาสของการเกิดโฟโตอิเล็คตรอนนั้นไม่เป็น 100 % จึงทำให้เกิดคลื่นของกระแสดังกล่าว ตามเวลาที่เปลี่ยนไปก็จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรอบๆค่าหนึ่ง ซึ่งการเกิดความไม่คงที่ของกระแสจากอุปกรณ์รับแสงในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การเกิดช็อคตอโนยส์ ดังรูปที่ 2.16

กำหนดให้ช็อคตอโนยส์สามารถหาได้โดยสมการ

$$i_{NS}^2 = 2ei\Delta f \tag{2.6}$$

$$i_{NS}^2 = 2e(i_s + I_D)\Delta f \tag{2.7}$$

โดยที่  $e$  คือประจุของอิเล็กตรอน โดยที่  $I = (i_s + I_D)$  เมื่อ  $i_s$  คือค่าเฉลี่ยของกระแสโฟโต  $I_D$  คือการเสียมืด (Dark current) และ  $\Delta f$  คือแบนด์วิธของอุปกรณ์รับแสง

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) กล่าวคือในการที่อุปกรณ์รับแสงจะแสดงผลออกมาเหมือนกับสัญญาณที่ส่งมาหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ว่า ค่าของกำลังของสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์รับแสงต้องมากกว่าค่าของกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในวงจรของอุปกรณ์รับแสง ซึ่งในทางเทคนิคมีวิธีการเปรียบเทียบระหว่างกำลังของสัญญาณจากอุปกรณ์รับแสงกับกำลังของสัญญาณรบกวนทั้งหมดในรูปของอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณกับกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio : SNR) ตัวอย่างเช่น ถ้าค่า SNR มีค่าสูงมากๆ แสดงว่าสัญญาณรบกวนมีผลต่อสัญญาณน้อยมากๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือสัญญาณที่ได้มีคุณภาพดีมากๆ

ตัวอย่างที่จะแสดงให้เห็นต่อไปนี้จะเป็นการพิจารณา SNR ของกรณีที่กำลังของแสงถูกตรวจวัดได้โดยพินโฟโตไดโอด เมื่ออุปกรณ์รับแสงสามารถที่จะเปลี่ยนกำลังของแสงมาเป็นกระแส ( $i_s$ ) ได้จากสมการ

$$i_s = \frac{\eta e P}{hf} \tag{2.8}$$

โดยที่  $P$  คือกำลังของแสงที่ตกลงบนอุปกรณ์รับแสง ดังนั้นกำลังที่ได้จากอุปกรณ์รับแสงสามารถเขียนได้เป็น

$$P_s = i^2 R_t = \left( \frac{\eta e P}{hf} \right)^2 R_t \tag{2.9}$$

กำลังของช็อคตอโนยส์ เขียนได้เป็น

$$P_{AS} = 2ei\Delta f \left\{ \left( \frac{\eta e P}{hf} \right) + I_D \right\} R_L \quad (2.10)$$

กำลังของเทอร์มินัลนอยส์ เขียนได้เป็น

$$P_{NT} = 4kT\Delta f \quad (2.11)$$

ดังนั้น SNR หรืออัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนสามารถที่จะเขียนได้เป็น

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Signal Power}}{\text{Noise Power}}$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta e P / hf)^2 R_L}{2eR_L \Delta f (I_D + \eta e P / hf) + 4kT\Delta f} \quad (2.12)$$

สมการข้างต้นแสดงถึง SNR สำหรับกรณีที่กำลังของแสงมาตกกระทบลงบนอุปกรณ์รับแสงมีค่าคงที่มีข้อสังเกตบางประการที่ได้จากสมการดังกล่าวคือ กำลังของแสงจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำให้ SNR มีการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น ถ้าค่ากำลังของแสงมีค่าสูงกำลังของสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อสัญญาณจะลดลง โดยอิทธิพลของสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่จะมาจากข้อนอยส์ เช่น ในกรณีของการส่งสัญญาณแสงที่ระยะทางสั้นๆ ซึ่งกำลังของแสงไม่มีการสูญเสียระหว่างที่เดินทางตามเส้นใยแก้วนำแสงมากนัก แต่ถ้ากำลังของแสงต่ำ เช่น ในกรณีของการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่ระยะทางไกลๆ กำลังของสัญญาณรบกวนจากเทอร์มินัลนอยส์ จะมีผลต่อ SNR มาก แต่อย่างไรก็ดี SNR สามารถเขียนให้อยู่ในรูป ของ dB ได้ดังนี้

$$SNR = 10 \log \left( \frac{S}{N} \right) \quad (2.13)$$

บิตค่าผิดพลาด (Bit error rate , BER) กล่าวคือ สำหรับระบบการส่งสัญญาณแบบดิจิทัล นั้น การแสดงถึงคุณภาพของสัญญาณจะอยู่ในรูปของ BER แทนที่จะเป็น SNR โดยทั่วไปสามารถเขียนนิยามของ BER ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$BER = \frac{\Delta B}{B} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\Delta B$  และ  $B$  คือบิตที่ผิดพลาด และจำนวนบิตทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ถ้าระบบส่งสัญญาณแบบดิจิทัลระบบหนึ่งมี BER เท่ากับ  $10^{-9}$  ค่า BER ขนาดนี้หมายความว่าทุกๆ  $10^9$  บิต ที่อุปกรณ์รับแสงรับได้จะมี 1 บิตที่เกิดผิดพลาดเกิดขึ้น BER นี้จะมีมาตรฐานต่างๆ กันขึ้นอยู่กับงาน เช่น โดยทั่วไป BER สำหรับส่งข้อมูลคอมพิวเตอร์ย่อมต่ำกว่า BER สำหรับการส่งผ่านเสียงทางโทรศัพท์ เนื่องจากว่าจำนวนบิตที่ผิดพลาดไปในกรณีของการส่งสัญญาณทางเสียงยังพอทำให้ผลของการรับฟังไม่มีปัญหาเท่าใดนัก แต่ถ้าเป็นกรณีของการส่งผ่านข้อมูลทางการเงินจำนวนบิตที่ผิดพลาดไปอาจหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลทางการเงินที่สำคัญก็ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ระบบการสื่อสารทางแสง

#### 3.1 ระบบพื้นฐาน

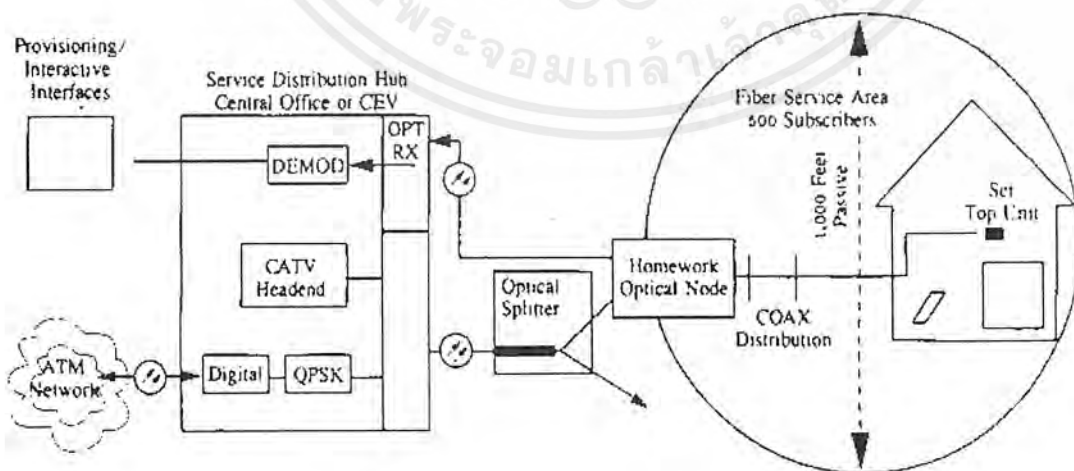
พิจารณาระบบพื้นฐานของการสื่อสารทางแสงหรือใยแก้วนำแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ได้ทั้งกับการสื่อสารแบบอนาล็อก (Analog) และแบบดิจิทัล (Digital) โดยเริ่มพิจารณาจากหลักการและองค์ประกอบเบื้องต้นเป็นลำดับไปคือ

##### 3.1.1 เครื่องส่ง (Transmitter)

เครื่องส่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณที่ได้ถูกมอดูเลตและขยายแล้ว โดยการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสง ชุดเครื่องส่งนี้จะมีส่วนประกอบหลักคือ แหล่งกำเนิดแสง และวงจรขับที่สามารถทำการขยายและมอดูเลตสัญญาณได้

##### 3.1.2 เครื่องรับ (Receiver)

เครื่องรับจะทำหน้าที่รับสัญญาณแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยเครื่องรับจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์รับแสงและขยายกำลัง ในกรณีที่เครื่องรับสัญญาณทำหน้าที่ขยายกำลังแสงเพื่อส่งต่อไปจะเรียกว่า อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงใหม่ด้วย โดยทั่วไปจะใช้อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (APD) หรือพินโฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์เพื่อประกอบเป็นเครื่องรับสัญญาณ

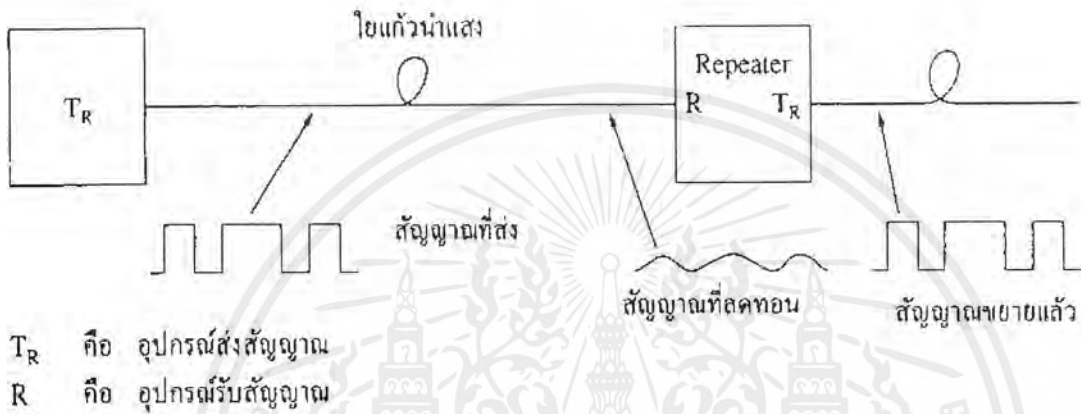


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 อุปกรณ์ทวนสัญญาณ

สัญญาณแสงที่เดินทางไปในเส้นใยแก้วนำแสง จะมีการสูญเสียสัญญาณไปกับระยะทางหรือความยาวของใยแก้วนำแสง ดังนั้นเมื่อถึงระยะทางหนึ่งสัญญาณแสงอาจจะต่ำมากจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีการทวนสัญญาณซึ่งไดอะแกรมของอุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมของชุดอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

### 3.1.4 ใยแก้วนำแสง

เส้นใยแก้วนำแสงเป็นส่วนที่จะทำหน้าที่ให้การสื่อสารนั้นประกอบเข้าเป็นระบบได้ เพราะทำให้สามารถติดต่อกันได้ในระยะทางไกลและเป็นจำนวนมากอีกด้วย

### 3.1.5 การมอดูเลชัน การมัลติเพล็กซ์ และการเข้ารหัส

การเข้ารหัสทำหน้าที่ในการจัดรูปสัญญาณให้เหมาะสม

## 3.2 การมัลติเพล็กซ์

การมัลติเพล็กซ์เป็นวิธีที่สามารถส่งและรับข้อมูลจากแหล่งต่างๆ จำนวนมากได้โดยอยู่ในช่วงเวลาและตัวกลางเดียวกันการสื่อสารใยแก้วนำแสงน่าจะมีประโยชน์อย่างมากทั้งนี้เพราะเป็นระบบที่มีช่วงของแบนด์วิดท์ที่กว้างมาก ดังนั้นหากมีการนำระบบมัลติเพล็กซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ร่วมกันก็ย่อมทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลจำนวนมหาศาลได้ภายในช่วงเวลาเดียวกันระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้กันอยู่พอจำแนกได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing, TDM)

ระบบที่ใช้การสื่อสารที่มีการแบ่งเวลาเป็นช่วงๆ โดยในแต่ละช่วงจะใช้สำหรับการบรรจุข้อมูลที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต่างๆ เรียงกันไป ในรูปที่ 3.3(ก) เป็นการทำงานของวิธีการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลาที่ต้องการส่งข้อมูลจาก 4 ช่องสัญญาณพร้อมกัน โดยในแต่ละช่องสัญญาณจะส่งข้อมูลเป็นคำๆละ 4 บิต ข้อมูลทั้ง 4 ช่องจะถูกเลือกด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายสวิตช์ เชื่อมระหว่างภาคส่งและภาครับอย่างสัมพันธ์กัน โดยมีสัญญาณซิงโครไนซ์ (Synchronize) คอยควบคุม

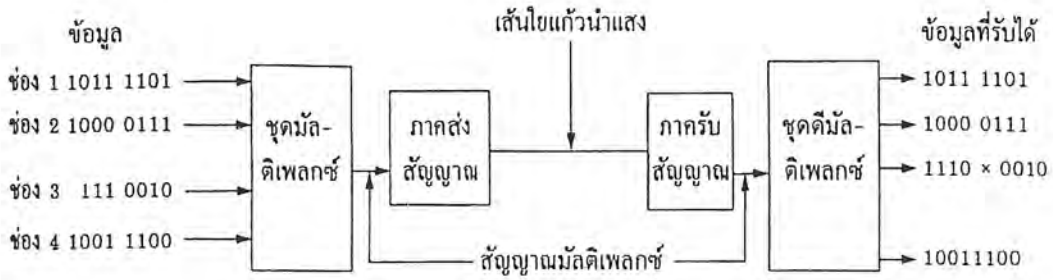
ระยะเวลาที่ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลในแต่ละช่องต้องเท่ากันและต้องมีช่วงเวลาพอที่จะส่งข้อมูลทั้งคำหรือ 4 บิตได้ เมื่อเริ่มต้นทำงานสวิตช์เลื่อนไปครบ 1 รอบ ข้อมูลที่เป็นคำแรกของทุกช่องสัญญาณจะถูกส่งไปยังภาครับครบทั้ง 4 ช่อง ชุดของข้อมูลที่ส่งไปในหนึ่งรอบนี้เรียกว่า เฟรม ดังแสดงด้วยไดอะแกรมเวลาในรูปที่ 3.3(ข) ในแต่ละเฟรมของข้อมูลควรมีสัญญาณอื่นแทรกไว้เพื่อคอยบอกให้ทราบว่าข้อมูลหมดเฟรมแล้ว ซึ่งภาครับจะได้เตรียมตัวสำหรับสัญญาณในเฟรมใหม่ต่อไป ในทางปฏิบัติสัญญาณข้อมูลอื่นๆอาจถูกมอดูเลตและเข้ารหัสด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปเก็บไว้ในวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) สำหรับพักข้อมูล และรอเวลาในระบบมัลติเพลกซ์ ดังนั้นระบบการแบ่งเวลาจึงเหมาะสำหรับข้อมูลที่มีอัตราการส่งช้า โดยจะช่วยให้สามารถส่งข้อมูลได้พร้อมกันหลายช่องด้วยระบบมีอัตราการส่งข้อมูลรวมสูงมาก อัตราการส่งข้อมูล ( $B_d$ ) ของระบบมัลติเพลกซ์นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$B_d = C_n + T_n \quad (3.1)$$

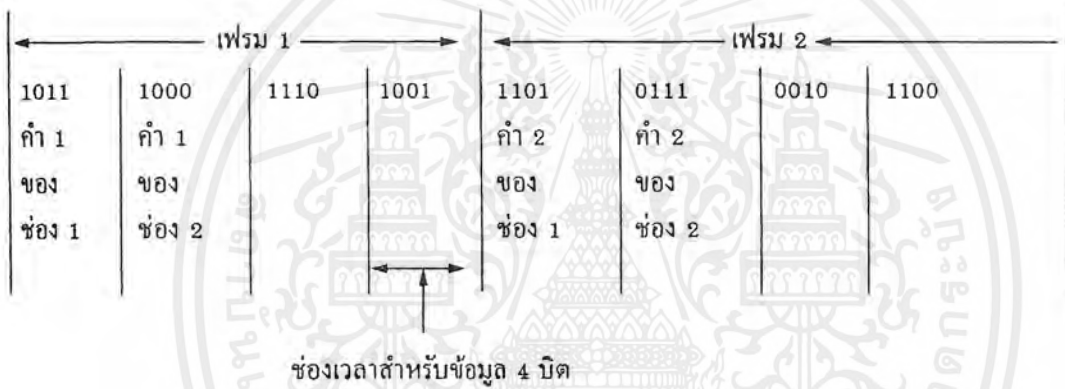
เมื่อ  $C_n$  และ  $T_n$  คือจำนวนช่อง และอัตราการส่งแต่ละช่อง

ตัวอย่างเช่น เราต้องการส่งข้อมูลจำนวน 8 ช่องสัญญาณพร้อมกันโดยในแต่ละช่องสัญญาณมีอัตราการส่งข้อมูล 1000 บิตต่อวินาที หรือ 8000 บิตต่อวินาที สามารถใช้ระบบมัลติเพลกซ์ชนิดการแบ่งเวลาที่มีอัตราการส่งข้อมูล  $8 \times 8000 = 64$  กิโลบิตต่อวินาทีได้

และจากรูปที่ 3.3(ค) แสดงถึงการส่งข้อมูลแบบซิงโครไนซ์โดยในชุดของมัลติเพลกซ์และดีมัลติเพลกซ์นั้นจะใช้สัญญาณนาฬิกาเดียวกัน

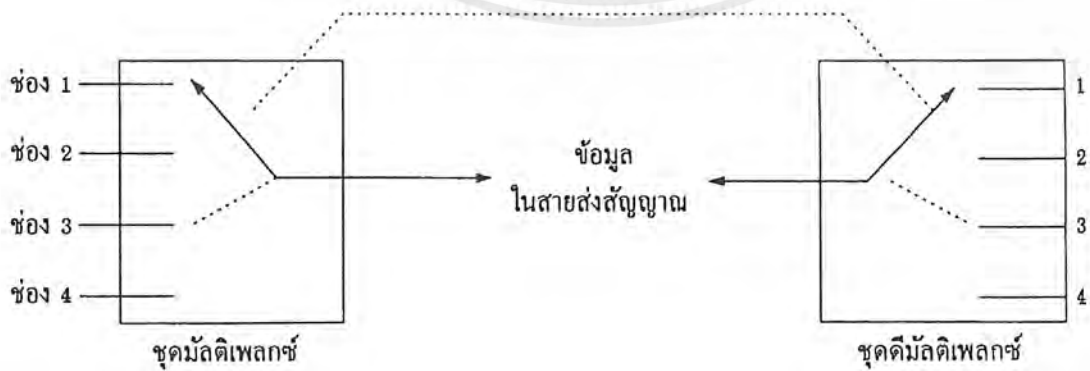


รูปที่ 3.3(ก) ลักษณะมัลติเพลกซ์



รูปที่ 3.3(ข) การส่งเป็นเฟรม

สัญญาณเชิงโครโมโซม

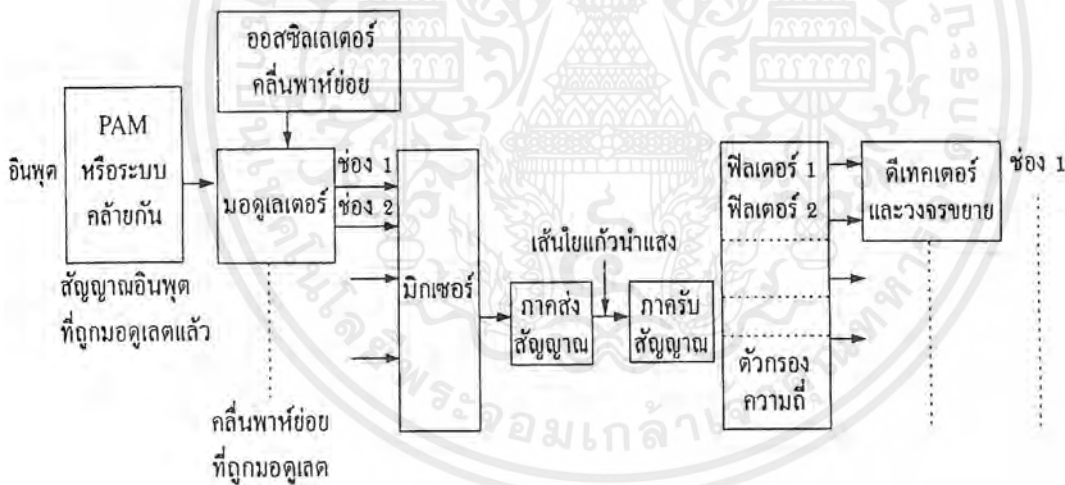


รูปที่ 3.3(ค) การเชิงโครโมโซม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

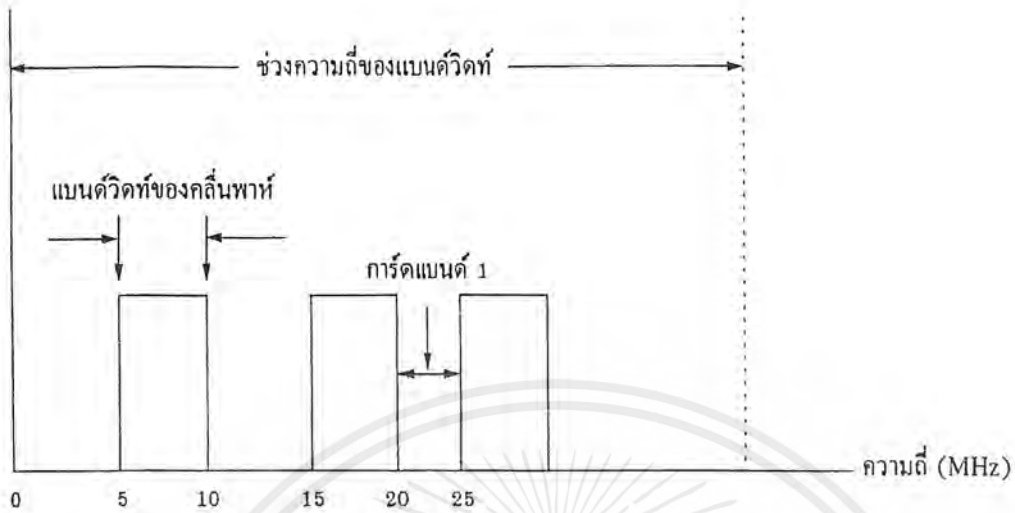
### 3.2.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing, FDM)

ระบบมัลติเพล็กซ์ที่แบ่งช่วงความถี่ของสัญญาณส่งออกเป็นช่วงความถี่ย่อย เพื่อทำหน้าที่เป็นพาหะย่อยของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณ ดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 สมมติว่าระบบเส้นใยแก้วนำแสงมีช่วงแบนด์วิดท์หรือความถี่มากที่สุดสัญญาณเป็น 100 เมกะเฮิร์ตซ์ เราอาจแบ่งช่วงความถี่ดังกล่าวออกเป็นช่วงความถี่ย่อยที่มีขนาด 5 เมกะเฮิร์ตซ์ ช่วงความถี่ย่อยนี้จะถูกใช้สำหรับการมอดูเลตสัญญาณอินพุตในแต่ละช่องนั้น ระยะระหว่างแต่ละความถี่ย่อยในแต่ละช่วงจะถูกกันด้วยช่วงความถี่ป้องกันหรือการ์ดแบนด์ (Guard Band) เพื่อมิให้สัญญาณมีการปะปนกัน รูปที่ 3.5 สัญญาณ ที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกจัดเรียงเป็นระเบียบและถูกส่งรวมกันไปในระบบ การแบ่งความถี่นั้นสัญญาณอินพุตอาจต้องทำการผสมสัญญาณหรือมอดูเลตถึง 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรกเป็นการเข้ารหัสสัญญาณอินพุตที่เป็นแอนาล็อกให้เป็นดิจิทัล จากนั้นสัญญาณที่เข้ารหัสแล้วจะถูกมอดูเลตกับคลื่นพาห้ย่อยแบบ เอเอ็ม (Amplitude Modulation, AM) หรือเอฟเอ็ม (Frequency Modulation, FM)



รูปที่ 3.4 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงช่วงคลื่นพาหะย่อยในแต่ละช่องสัญญาณของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่

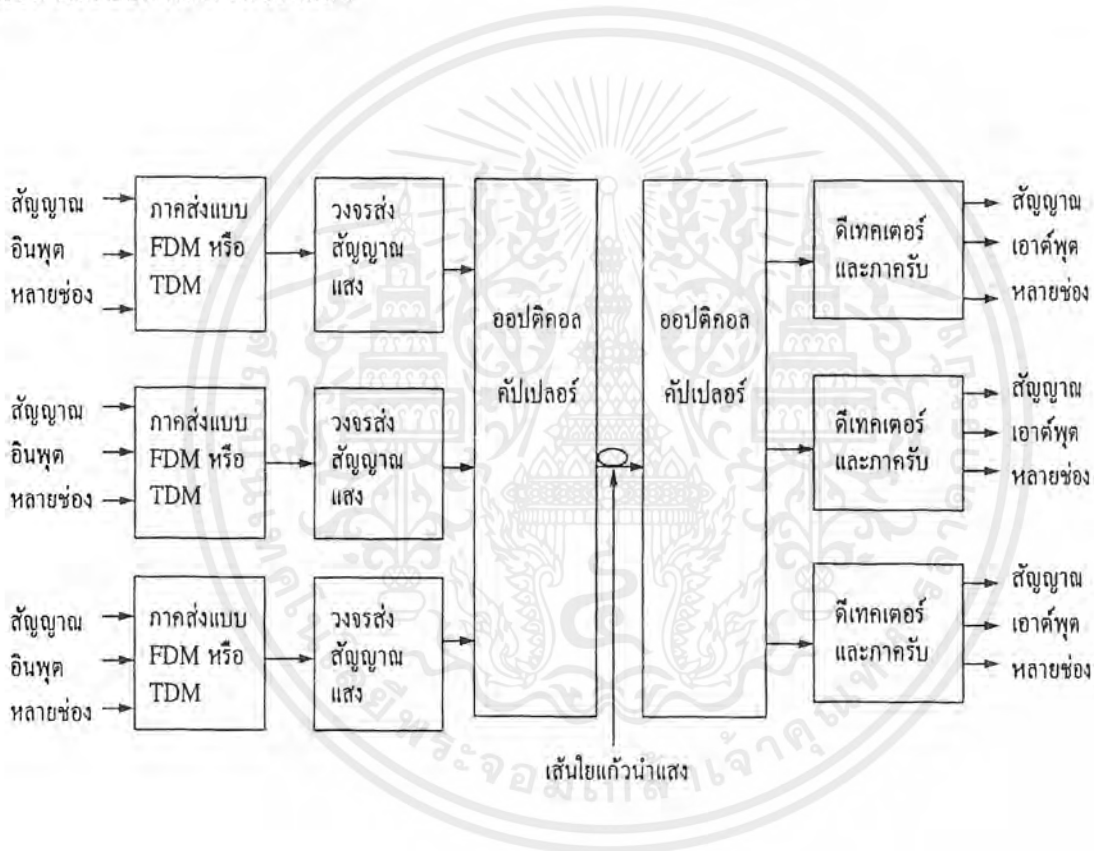
ในขั้นตอนที่สองและขั้นตอนสุดท้ายเป็นการรวมสัญญาณทั้งหมดที่ถูกมอดูเลตในแต่ละช่องสัญญาณเข้าด้วยกัน เพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงใช้ส่งเป็นข้อมูลได้ที่ภาครับของระบบการแบ่งความถี่ อุปกรณ์รับสัญญาณจะแปลงสัญญาณไฟฟ้าของคลื่นความถี่ที่ส่งออกมาแล้วผ่านเข้าไปในวงจรกรองความถี่ที่เหมาะสม เช่น จากตัวอย่างข้างต้นอาจใช้วงจรกรองในช่วงความถี่ 5-10, 15-20 เมกะเฮิรตซ์ เป็นต้น ข้อมูลสัญญาณที่ถูกกรองแล้วจะถูกดีมอดูเลตเพื่อทำให้กลับคืนสู่รูปสัญญาณเดิมอีกครั้งหนึ่งในแต่ละช่องสัญญาณก่อนนำไปใช้งานต่อไป

ปัญหาการใช้งานระบบการแบ่งความถี่จะเกิดขึ้นในขณะที่มีการผสมคลื่นพาหะย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เพราะสามารถทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ที่เรียกว่าครอสทอล์ก (Crosstalk) ขึ้นได้ง่าย การแก้ไขทำได้ด้วยวิธีทางแสงโดยการสร้างสัญญาณแสงของข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณก่อน จากนั้นทำการรวมสัญญาณแสงทั้งหมดให้เป็นสัญญาณเดียวกันด้วยอุปกรณ์ทางแสงที่เรียกว่าคูปเลอร์ หรือ คัปเปิลเลอร์ (Coupler) ทำให้ได้สัญญาณแสงรวมส่งไปยังผู้รับ ลักษณะของสัญญาณแสงนี้อาจใช้ระดับความเข้มแสงช่วยกำหนดชนิดของข้อมูลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing, WDM)

เป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นพาหะนำข้อมูล โดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งด้วยออปติคอลลับเปลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งจะสามารถบรรจุข้อมูลได้หนึ่งชุด และข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณได้ เพราะการจัดระบบข้อมูลสามารถเลือกใช้ระบบการแบ่งเวลาหรือการแบ่งความถี่ก็ได้มาทำการมอดูเลตกับคลื่นแสงที่เป็นตัวนำส่งข้อมูลและเนื่องจากสัญญาณคลื่นแสงที่มีค่าความยาวคลื่นต่างกันยอมให้สีที่ต่างกัน บางครั้งระบบการแบ่งความยาวคลื่นจะถูกเรียกว่าระบบการผสมสีของแสง



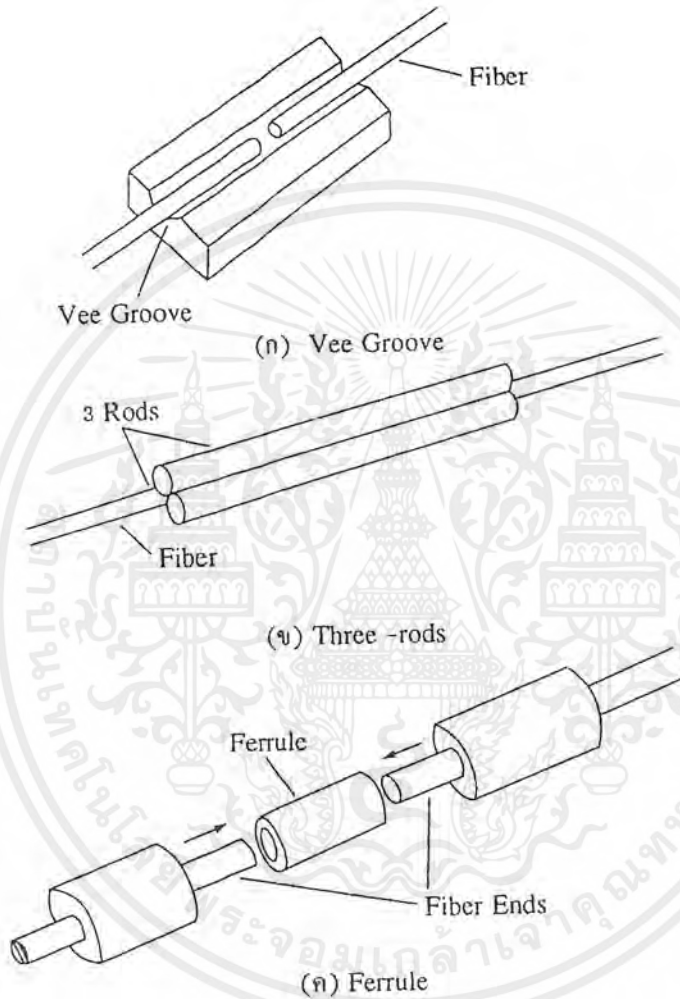
รูปที่ 3.6 แสดงการทำงานของระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงมีหลายวิธี ซึ่งการที่จะเลือกวิธีใดก็ตามแต่ความเหมาะสมกับงานต่างๆ ที่ต้องการติดตั้งในระบบสื่อสาร หรือเครือข่ายสื่อสาร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 3.3.1 การเชื่อมต่อด้วยวิธีการเชื่อมต่อเชิงกล (Mechanical Splice)



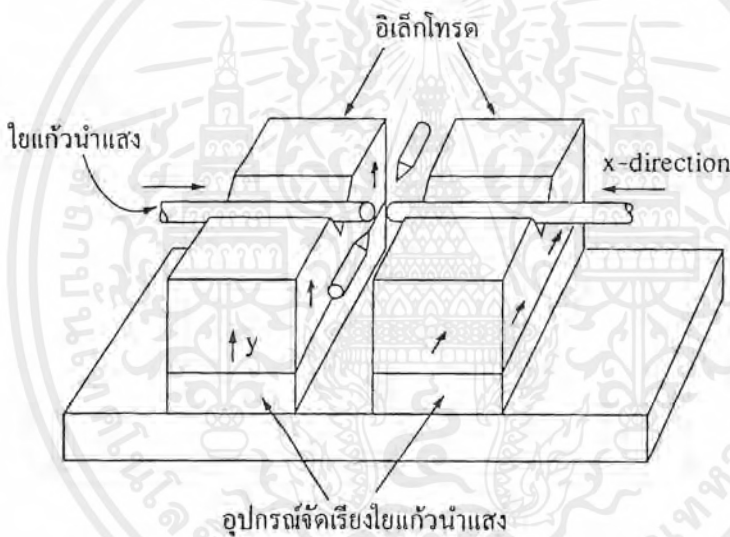
รูปที่ 3.7 แสดงแบบต่างๆ ของการเชื่อมต่อใยแก้วเชิงกล

หลักการทั่วไปของการเชื่อมต่อเชิงกล (Mechanical splice) ที่แสดงในรูปที่ 3.7 ก็คือ การวางเส้นใยแก้วนำแสงให้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม และพยายามทำให้ปลายทั้งสองของเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ชิดกันมากที่สุด ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ในการเชื่อมต่อนี้ จะช่วยลดการสูญเสียแสงเนื่องจากการติดตั้ง จากการเบี่ยงเบนในแนวต่างๆ ลง ตัวอย่างเช่น การที่จะส่งผ่านสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วนำแสงอันหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด ตรงรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสอง อาจมีการใช้เจลเชื่อมต่อด้วย (Index Matching Gel) ซึ่งมีลักษณะเป็นเอกลสารเป็นเอกลสารทึบแสงไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลวใสที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง การเชื่อมต่อดังวิธีนี้อาจทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณอยู่ในช่วง 0.1 – 0.5 dB

### 3.3.2 การเชื่อมต่อดังวิธีการหลอมรวม (Fusion splice)

การเชื่อมต่อดังวิธีการหลอมรวมเป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นเข้าด้วยกันโดยการให้ความร้อนปลายเส้นใยแก้ว จากนั้นปลายของเส้นใยแก้วจะถูกดันมาเชื่อมต่อกัน การเชื่อมต่อในลักษณะนี้เป็นการเชื่อมต่อแบบถาวร เส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกันแล้วดูเหมือนว่าเป็นเส้นเดียวกัน การสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อดังวิธีนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01- 0.2 dB ในขั้นตอนของการเชื่อมต่อนั้นความร้อนที่ทำให้ปลายเส้นใยแก้วนำแสงอ่อนตัว มาจากประกายไฟที่เกิดจากการอาร์ก ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในการหลอมรวม ตามรูปที่ 3.8








รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกันด้วยวิธีการหลอมรวม

สำหรับการเชื่อมต่อแบบหลอมรวมแบบเดิมนั้น การปรับตำแหน่งการวางตัวของเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้น อาศัยวิธีการปรับฐานรองด้วยการสังเกตผ่านกล้องขยาย แต่ในปัจจุบันมีการใช้วิธีการทางแสงมาช่วยในการจัดวางดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อการดำเนินงานเป็นไปอย่างอัตโนมัติ วิธีการนี้มีชื่อว่า แอลไอดี (Light Injection and Detection, LID) โดยอาศัยหลักการตรวจวัดปริมาณแสงที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 ซึ่งส่งผ่านมาจากเส้นใยแก้วเส้นที่ 1 ถ้าพบว่าการวางตัวของเส้นใยแก้วทั้งสองอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ปริมาณแสงที่ตรวจวัดได้จะให้ค่ามากที่สุดพร้อมที่จะทำการหลอมรวม แสงที่ใช้ในการตรวจสอบมาจากการส่งผ่านแสงของแอลอีดี (LED) เข้าไปในบริเวณที่เส้นใยแก้วถูกทำให้โค้ง โดยท่อทรงกระบอกซึ่งมีรัศมีเล็ก (ประมาณ 2-3 มิลลิเมตร) และการตรวจเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดแสงก็อาศัยอุปกรณ์รับแสง ซึ่งวางชิดกับบริเวณที่ถูกทำให้โค้งของเส้นใยแก้วนำแสง วิธีการฉายแสงและตรวจวัดแสงดังกล่าว อาศัยคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงเกี่ยวกับการโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสงที่ทำให้เกิดการสูญเสียแสงขึ้น

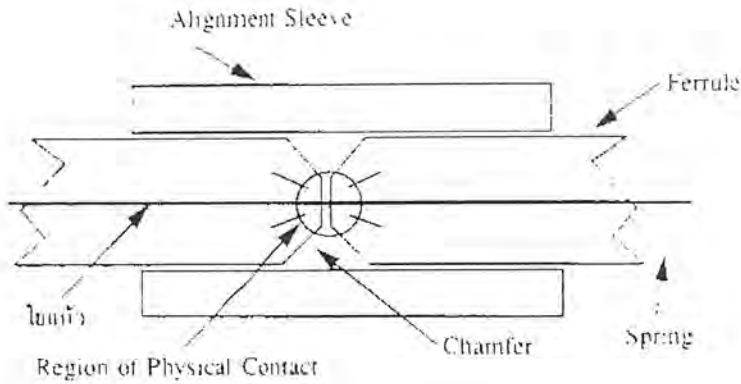
### 3.3.3 การเชื่อมต่อด้วยหัวเชื่อมต่อ (Connector)

นอกจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกันตามวิธีการหลอมรวมดังที่กล่าวมาแล้ว การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงยังสามารถทำได้โดยการใช้หัวเชื่อมต่ออีกด้วย การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงแบบใช้หัวเชื่อมต่อซึ่งอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้ในการถอดเปลี่ยนได้ตามความจำเป็น ในปัจจุบันมีการผลิตหัวเชื่อมต่อสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงออกมาหลายแบบดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) และ รูปที่ 3.9 (ข) ซึ่งการเลือกใช้แบบใดก็ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วหัวเชื่อมต่อได้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยทำให้ปลายเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นอยู่ใกล้กันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ นอกจากนี้หัวเชื่อมต่อยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ เช่น แข็งแรง ทนทาน เมื่อใช้งานทำให้เกิดการสูญเสียของแสงต่ำและมีราคาถูก เป็นต้น

Series	Configuration	Dimension	Features	Insertion Loss		Loss Repeat Ability
				MM	SM	
Biconic		36(L) × Φ13mm	Screw Dry Connection Resists Pistoning	< 1.0dB	< 0.6dB	1,000 Times
D4		34(L) × Φ9mm	Screw Maintaining Stability Easily Terminated	< 0.6dB	< 0.6dB	1,000 Times
SC		57(L) × 7(H) × 6(W)mm	Push-Pull anti-Corrosive High Reliability	< 0.4dB	< 0.4dB	1,000 Times
FC		42(L) × Φ15mm	Screw High Reliability Maintaining Stability	< 0.4dB	< 0.5dB	1,000 Times
ST		45(L) × Φ6mm	Bayonet Quick Inter Connect High Reliability	< 0.6dB	< 0.7dB	1,000 Times

รูปที่ 3.9 (ก) แสดงตัวอย่างของหัวเชื่อมต่อแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 (ข) แสดงการวางตัวของใยแก้วในการเชื่อมต่อ

### 3.4 การสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ

ระบบสื่อสารใยแก้วนำแสงต่างๆ ไปนั้นในการประกอบกันเป็นระบบจะต้องมีการเชื่อมต่อในส่วนของใยแก้วนำแสงเสมอ โดยการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงนั้นอาจมีการคลาดเคลื่อนซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณได้ จากลักษณะต่างๆของใยแก้ว ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.10 ที่เป็นลักษณะของการวางตัวของใยแก้วในการเชื่อมต่อซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียสัญญาณซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดแต่ละกรณีต่อไป

#### 3.4.1 การผิดพลาดจากพื้นที่แกน

สำหรับใยแก้วนำแสงหลายโหมด (Multi mode) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของใยแก้วนำแสงส่ง ( $D_s$ ) และใยแก้วนำแสงเส้นรับ ( $D_r$ ) แล้วการสูญเสีย  $L_c$  เขียนได้เป็นสมการ

$$L_c (dB) = 20 \log \left( \frac{D_s}{D_r} \right) \quad (3.2)$$

สำหรับใยแก้วโหมดเดี่ยว (Single mode) นั้น การสูญเสียจะเกิดจากการไม่สอดคล้องกันของเส้นผ่าศูนย์กลางของโหมดฟิลด์ เมื่อให้รัศมีของโหมดฟิลด์ ( $W$ ) เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ความยาวคลื่นตัดออฟ ( $\lambda_c$ ) เมื่อรัศมีแกนคือ  $a$  จะได้สมการของการสูญเสียเป็น

$$L_c = 20 \log \left[ 1 + \frac{(W_s / W_r)^2}{2(W_s / W_r)} \right] \quad (3.3)$$

$$\text{โดยที่} \quad W = a \left[ 0.65 + 0.434 \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \right]^2 + 0.0149 \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^6 \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

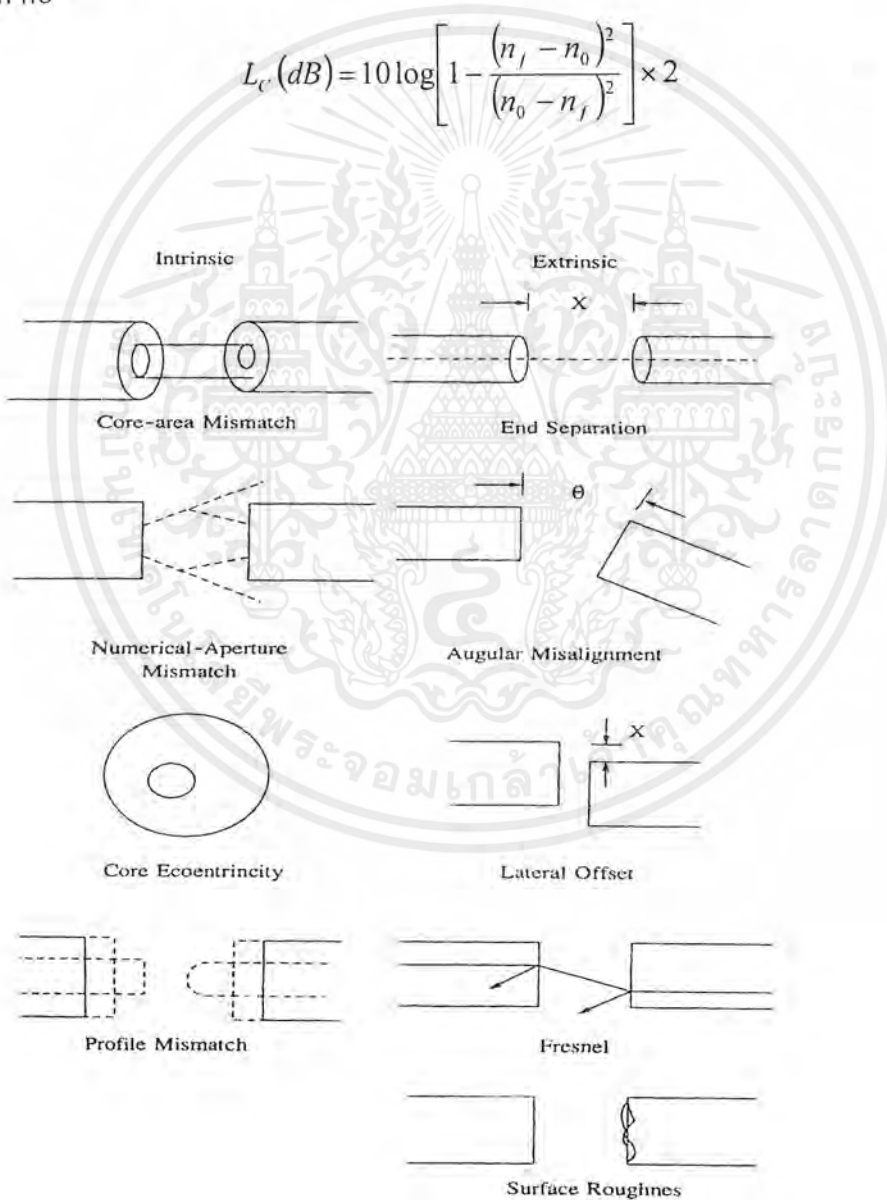
### 3.4.2 ความผิดพลาดเชิงมุม

ความผิดพลาดเชิงมุมในการเชื่อมต่อใยแก้วเป็นฟังก์ชันของนิวเมอริกัลลอปเปอร์เจอร์ ถ้า NA มีค่าน้อย ทำให้มีการสูญเสียง่าย (นิวเมอริกัลลอปเปอร์เจอร์ NA คือ การวัดว่าระบบของแสงว่าจะรับแสงได้มากน้อยเพียงใด ระบบของแสงอาจจะเป็นใยแก้วนำแสงหรือออบเจกทีฟเลนส์ (Objective Lens) หรือโฟโตกราฟิกเลนส์ (Photographic Lens) ซึ่งก็คือ ผลคูณของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงตกกระทบกับค่าไซน์ของมุม  $\theta$ , ที่มากที่สุด  $NA = n_i \sin \theta_{\max}$ )

### 3.4.3 การสูญเสียเฟรสนเนล

การเชื่อมต่อที่สมบูรณ์นั้นจะมีการสูญเสียเนื่องจากเฟรสนเนลที่บริเวณรอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศ คือ

$$L_c (dB) = 10 \log \left[ 1 - \frac{(n_f - n_0)^2}{(n_0 + n_f)^2} \right] \times 2 \quad (3.5)$$

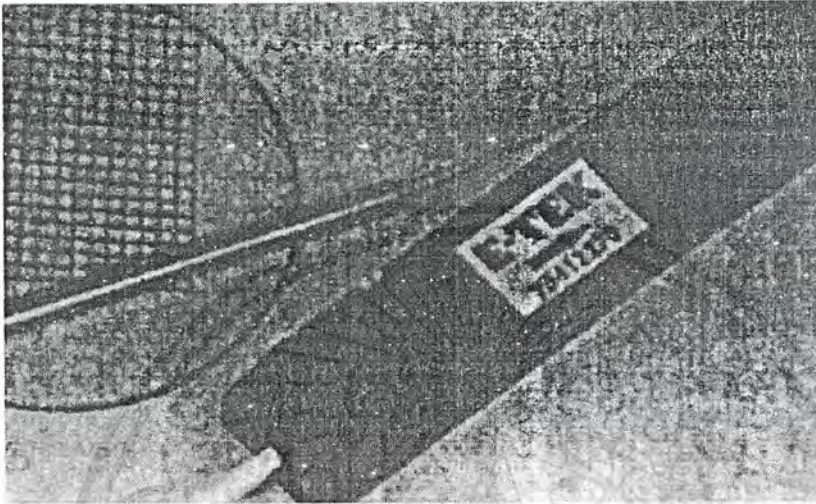


รูป 3.10 แสดงลักษณะต่างๆ ของการวางตัวของใยแก้วนำแสง

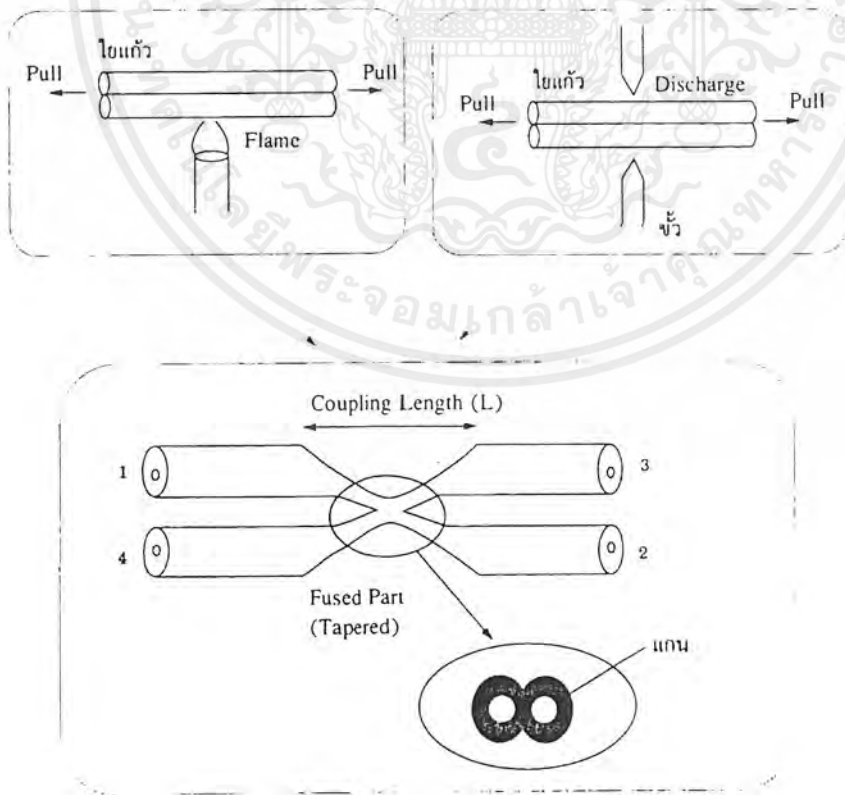
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การคู่ควมใยแก้วนำแสง (Coupler)

คัปเปิลเลอร์ทางแสงหรือคู่ควม เป็นอุปกรณ์ใยแก้วนำแสงชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่ในการแยกหรือรวมลำแสงเข้าด้วยกัน ทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมในระบบสวิตชิงและมัลติเพลกซ์ได้ด้วย โครงสร้างทางกายภาพของคัปเปิลเลอร์ แสดงดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 คัปเปิลเลอร์ทางแสงชนิด 3 พอร์ต หรือ 1 × 2 พอร์ต



รูปที่ 3.12 แสดงคัปเปิลเลอร์ 2 × 2 และวิธีการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 แสดงวิธีการทำคัปเปลอร์ โดยเริ่มจากการนำใยแก้วสองเส้นมาให้ความร้อนจนกระทั่งเป็นคัปเปลอร์ สำหรับการใช้งาน พิจารณาตัวอย่างเช่น ถ้ามีแสงถูกผ่านเข้าไปยังพอร์ตที่หนึ่ง เออดีฟุทจะออกมาทางพอร์ตที่สองและสามเป็นต้น โดยไม่มีเออดีฟุทออกมาทางพอร์ตที่สี่เลย ซึ่งกลไกนี้สำหรับการส่งสัญญาณในทางตรงกันข้ามก็คล้ายคลึงกัน คัปเปลอร์ ใยแก้วนำแสงมีให้เลือกหลายแบบ ดังตัวอย่างในรูปเป็นแบบ  $2 \times 2$  (มี 4 พอร์ต) ซึ่งอัตราส่วนของการแยกแอมพลิจูดของแสงขึ้นอยู่กับระยะห่างระยะสัมผัสของแกนของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสอง (Coupling Length,  $L$ ) คัปเปลอร์เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นชนิดหนึ่งในงานทางด้านเครือข่ายใยแก้วนำแสง

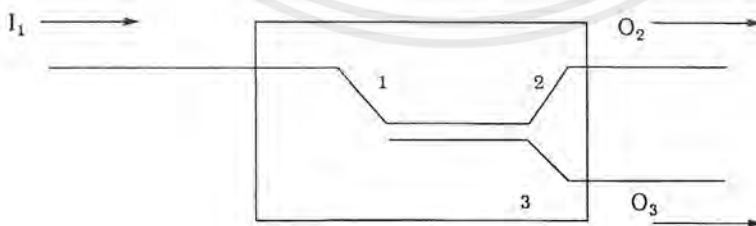
การกระจายสัญญาณไปสู่ผู้รับรายย่อย และรวมสัญญาณหลายสัญญาณเข้าสู่สายเส้นเดียว โดยไม่ใช้การแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และเป็นอุปกรณ์แสงที่ไม่ต้องการไฟเลี้ยง คุณสมบัติเหล่านี้ได้สร้างเป็นคู่วางตรงเส้นใยแก้วนำแสง

ตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้มีทางเข้า  $N$  พอร์ต และทางออก  $M$  พอร์ต แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 คู่วางแสง  $N \times M$

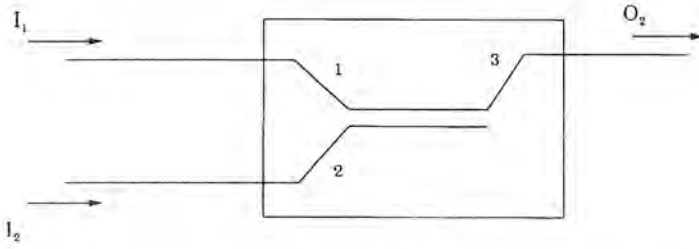
คู่วางแสงแบบนี้สามารถเชื่อมต่อได้ง่ายกับเส้นใยแก้วนำแสงและอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ การกำหนดชื่อตามคุณสมบัติคู่วางแสงคู่วางวาย (Y coupler) หรือตัวแยกแสงเป็นอุปกรณ์ที่แพร่พลังงานโดยมี 1 ทางเข้า และ 2 ทางออกดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงคู่วางวาย (Y coupler) หรือตัวแยกแสง

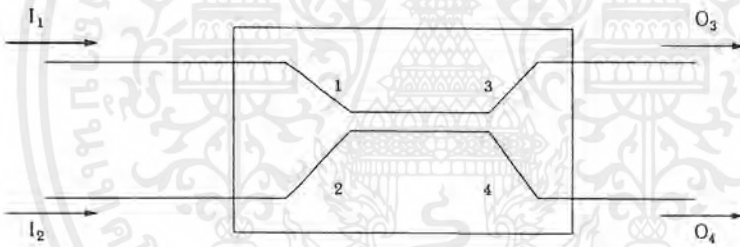
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเส้นหนึ่งจากสองเส้นของทางออกแบ่งพลังงานของแสงออกมา บางครั้งจะเรียกว่า คู่ควบที (T coupler) หรือกับดักแสงและสามารถใช้ตรวจสอบพลังงานของสายเมนหลักได้ อุปกรณ์ที่ใช้รวมสัญญาณจากเส้นใยแก้วสองเส้น ไปสู่เส้นเดียวจะเรียกว่า ตัวรวมแสง ดังรูปที่ 3.15



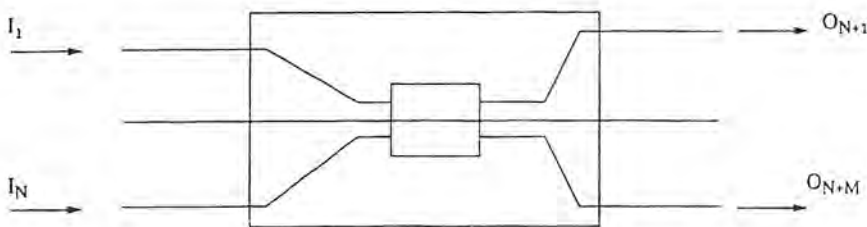
รูปที่ 3.15 แสดงตัวรวมแสง

ทั้งตัวรวมแสงและตัวแยกแสงจะเรียกว่า คู่ควบเอ็กซ์ (X coupler) หรือ  $2 \times 2$  คู่ควบตรง ( $2 \times 2$  coupler) ดังแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงคู่ควบเอ็กซ์ (X coupler)

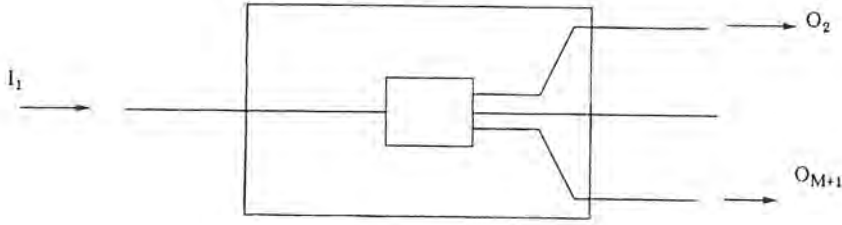
อุปกรณ์หลายพอร์ตมีทางเข้าหรือทางออกมากกว่า 2 ทาง จะเรียกว่า คู่ควบดาว (Star coupler) แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงคู่ควบดาว (Star coupler)

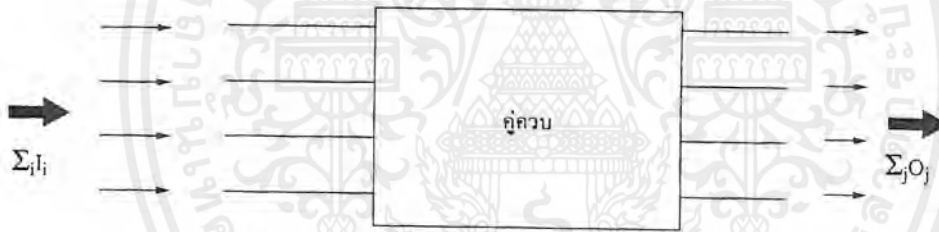
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าด้านหน้ามี 1 เส้น อีกด้านหนึ่งมากกว่า 2 เส้น จะเรียกว่า คู่ควบต้นไม้ (Tree coupler) แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงคู่ควบต้นไม้ (Tree coupler)  $1 \times M$

คู่ควบดาว (Star coupler) และคู่ควบต้นไม้ (Tree coupler) จำนวนมากใช้ในเครือข่ายท้องถิ่น (Local area networks) และใช้สนับสนุนผลิตภัณฑ์สำหรับการแบ่งพลังงานหรือรวมพลังงานแสง คุณลักษณะพื้นฐานของคู่ควบแสง (Optical coupler) แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงฟลักซ์พลังงานที่เข้าไปและออกจากคู่ควบแสง (optical coupler)

ถ้า  $I_i$  เป็นพลังงานที่ใส่เข้าไป  $O_j$  เป็นพลังงานที่ออกมา  $\Sigma I_i$  และ  $\Sigma O_j$  เป็นพลังงานรวม เข้าไปและออกมาของคู่ควบ (Coupler) ความแตกต่างของพลังงาน ( $\Delta P = \Sigma I_i - \Sigma O_j$ ) เป็นจำนวนของพลังงานไปในทางเดินของแสงจากพอร์ตทางเข้าไปถึงพอร์ตทางออก เพราะว่า การสะท้อนที่สูญหาย การกระเจิง และความไม่สมบูรณ์ของประสิทธิภาพการส่งผ่าน ( $\eta$ ) ของคู่ควบ (Coupler) กำหนดเป็น

$$\eta = \frac{\sum_j O_j}{\sum_i I_i} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้พลังงานที่สูญเสียเล็กน้อยเป็น

$$\Lambda = \frac{\Delta P}{\sum_i I_i} = 1 - \eta \quad (3.7)$$

การสูญเสียที่เกินมาของอุปกรณ์ในหน่วยเดซิเบลเป็น

$$L = -10 \log \eta \quad (3.8)$$

พลังงานที่ออกมาที่พอร์ตทางออก  $O_j$  เขียนได้เป็น

$$O_j = \sum_i A_{ji} I_i \quad (3.9)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์คู่ควบ (Coupler coefficient) ระหว่างพอร์ตทางเข้า  $i_{in}$  และพอร์ตทางออก  $j_{in}$  โดย  $A_{ji}$  แทนพลังงานเล็กน้อยที่เข้าไปในพอร์ตทางเข้า  $i_{in}$  กับออกที่พอร์ตทางออก  $j_{in}$  การสูญเสียจากการรวมแสงในหน่วยเดซิเบลตลอดความยาวจาก  $i_{in}$  ถึง  $j_{in}$  ให้ค่าเป็น

$$L = -10 \log A_{ji} \quad (3.10)$$

การวัดคู่ควบแสง (Optical coupler) โดยตรงแยกออกระหว่างพอร์ตทางเข้า เมื่อพลังงานไปในพอร์ต  $i_{in}$  ควรแยกออกระหว่างพอร์ต  $i_{in}$  และ  $k_{in}$  แสดงดังรูป 1.8

$$D_{ki} = 10 \log \frac{R_k}{I_i} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $R_k$  เป็นตัวเลขพลังงานที่ส่งกลับไปพอร์ต  $k_{in}$



รูปที่ 3.20 คัปเปลอร์ระหว่างพอร์ตทางเข้า 2 พอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของตัวแยกแสงของรูปที่ 1.8 พลังงาน  $I_1$  ไล่เข้าไปในพอร์ต 1 แบ่งไปยัง  $O_2$  และ  $O_3$  ที่พอร์ตทางออก 2 และ 3 อัตราส่วนแยกแสง  $S$  กำหนดเป็น

$$S = \frac{O_2}{O_3} \quad (3.12)$$

การสูญเสียจากการรวมแสงจาก 1-2 และ 1-3 เป็น

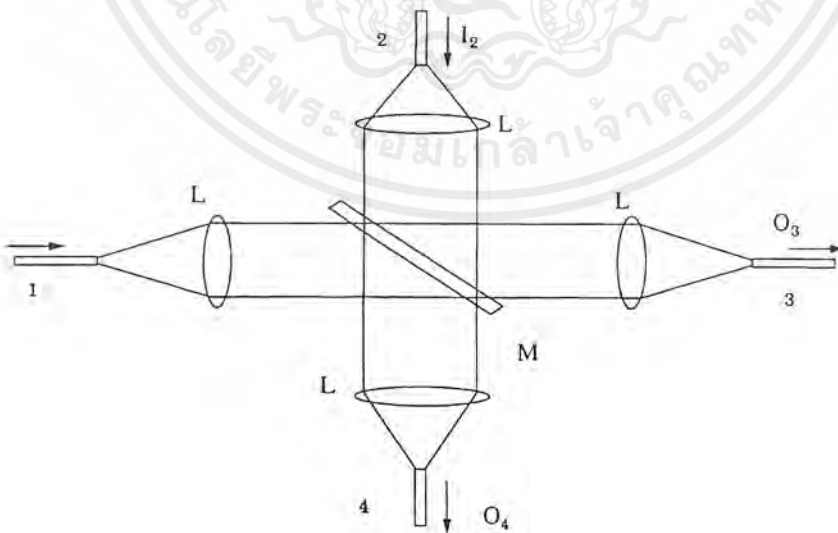
$$L_{21} = -10 \log \frac{O_2}{I_1} = -10 \log A_{21} \quad (3.13)$$

$$L_{31} = -10 \log \frac{O_3}{I_1} = -10 \log A_{31} \quad (3.14)$$

ส่วนกรณีของการรวมแสง สามารถกลับเป็น  $L_{12} = L_{21}$  และ  $L_{13} = L_{31}$

### 3.6 ไมโคร - ออปติคอลลัปเปลอร์ (Micro - Optical Coupler)

การแยกหรือการรวมสัญญาณแสงสามารถทำกับลำแสงขนานได้ แสดงดังรูปที่ 3.21 สำหรับรูปแบบคู่ควบเอ็กซ์ (X coupler) โดยแสงจะขนานและถูกโฟกัสโดยเลนส์ ปรากฏการณ์แยกและรวมแสงได้จากการที่กระจกสะท้อนให้ค่าการสะท้อน  $R$  เป็นค่าที่ต้องการ

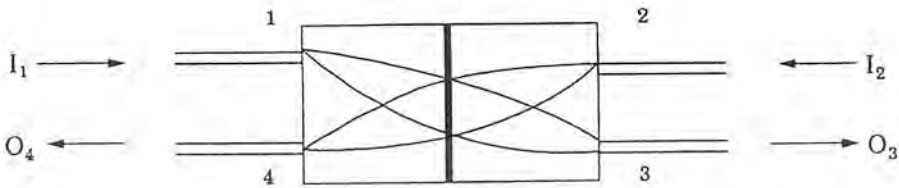


รูปที่ 3.21 แสดงรูปแบบลำแสงขนานของคู่ควบเอ็กซ์ (X coupler) เมื่อ L เป็นเลนส์รวมแสงและ M เป็นกระจกสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจริงคู่ควบสามารถสร้างให้เป็นอุปกรณ์แสงขนาดเล็ก (Micro lens) แสดงได้ดังรูปที่

3.22



รูปที่ 3.22 แสดงการคู่ควบเอ็กซ์ไมโคร - ออปติคอล (X Micro - Optical coupler)

สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงหลายเส้น โหมดความสูญเสียของคู่ควบไมโคร - ออปติคอล (Micro - Optical coupler) อยู่ในช่วงของ 0.5 ถึง 1 เดซิเบล คู่ควบดาว (Star coupler) สามารถสร้างโดยใช้ไมโคร - ออปติคอล Micro - Optical ได้

### 3.7 การสูญเสียเนื่องจากการคู่ควบ (Loss in coupler)

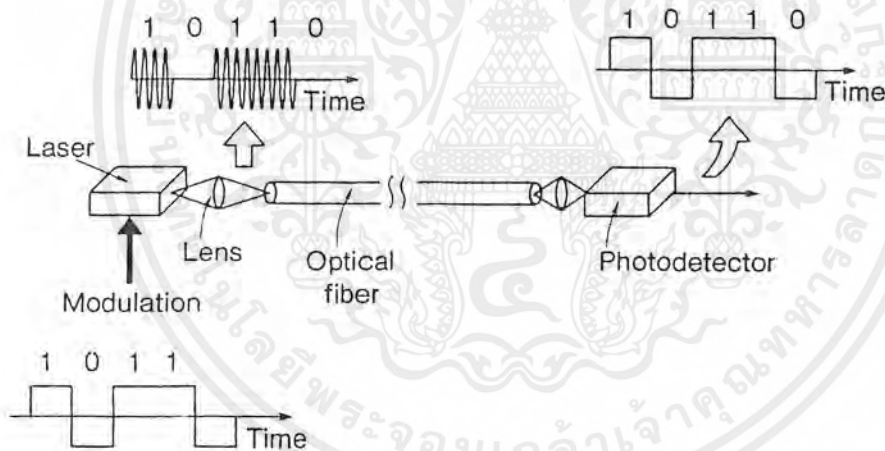
การสูญเสียเนื่องจากการคู่ควบเกิดจากการสะท้อนภายในและวัสดุที่ใช้ทำคู่ควบ ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากการคู่ควบหาได้จากอัตราส่วนคู่ควบ เพราะอัตราส่วนคู่ควบบอกถึงความสามารถในการแยกของพลังงานแสง และพลังงานแสงที่หายไปจะเป็นการสูญเสียเนื่องจากการคู่ควบ

## บทที่ 4

### ระบบออปติก

#### 4.1 หลักการพื้นฐานของระบบออปติกทางแสง (Coherent optical system)

ระบบนี้จะแตกต่างจากการตรวจจับโดยตรงที่แสดงดังรูป 4.1 ซึ่งสัญญาณข้อมูลจะถูกมอดูเลตเข้ากับเลเซอร์ แล้วส่งผ่านเข้าไปยังสายใยแก้วนำแสงโดยผ่านเลนส์รวมแสง สัญญาณแสงที่ส่งเข้าไปนี้จะมีลักษณะของกำลังแสงเป็นแบบเปิดและปิด (Switched on and switched off) หลังจากผ่านสายใยแก้วนำแสงแล้ว แสงจะถูกจับด้วยโฟโตไดโอด (Photo diode) โดยตรงและจะกำเนิดกระแสที่เป็นสัดส่วนกับกำลังงานทางแสงที่ได้รับ (Optical power)

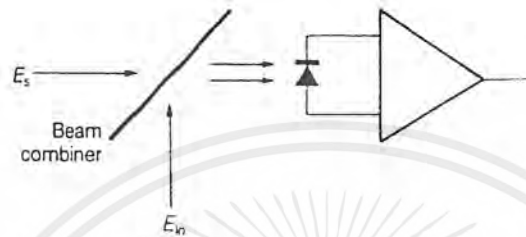


รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ IM-DD (Intensity – modulation direct detection)

ส่วนในการรับสัญญาณแบบออปติก (Coherent receiver) จะเพิ่มส่วนของคลื่นแสงเฉพาะที่ (Locally optical wave) เข้ากับคลื่นแสงที่ได้รับเข้ามา (Optical received wave) ก่อนที่จะส่งคลื่นที่รวมกันนี้ไปสู่โฟโตไดโอด (Photo diode) ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งกระแสของโฟโตไดโอด (Photo diode) นั้นจะบรรจุข้อมูลของสัญญาณทั้งหมด กำลัง เฟสและความถี่ ซึ่งการรวมกันของคลื่นแสง (Optical wave) 2 ตัวนี้จะสามารถทำได้ด้วยตัวแบ่งลำแสง (Beam Splitter) หรืออุปกรณ์คู่ควมเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber coupler)

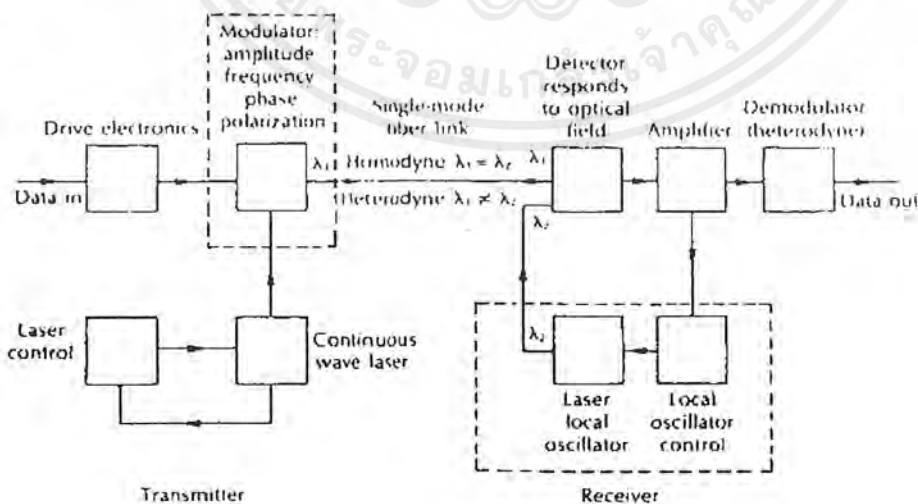
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการสื่อสารทางแสงแบบออปติคัลนั้น สัญญาณคลื่นแสงจากตัวส่งจะถูกมอดูเลต (Modulate) เข้ากับข้อมูลโดยการใช้การเปลี่ยนของแอมพลิจูด ความถี่ หรือเฟสของคลื่นแสง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสัญญาณที่เข้ารหัสสัญญาณแบบแอมพลิจูดซฟิคียอิง (Amplitude – shift keying , ASK) ฟริควนซีซฟิคียอิง (Frequency – shift keying , FSK) หรือ เฟสซฟิคียอิง (Phase – shift keying , PSK)



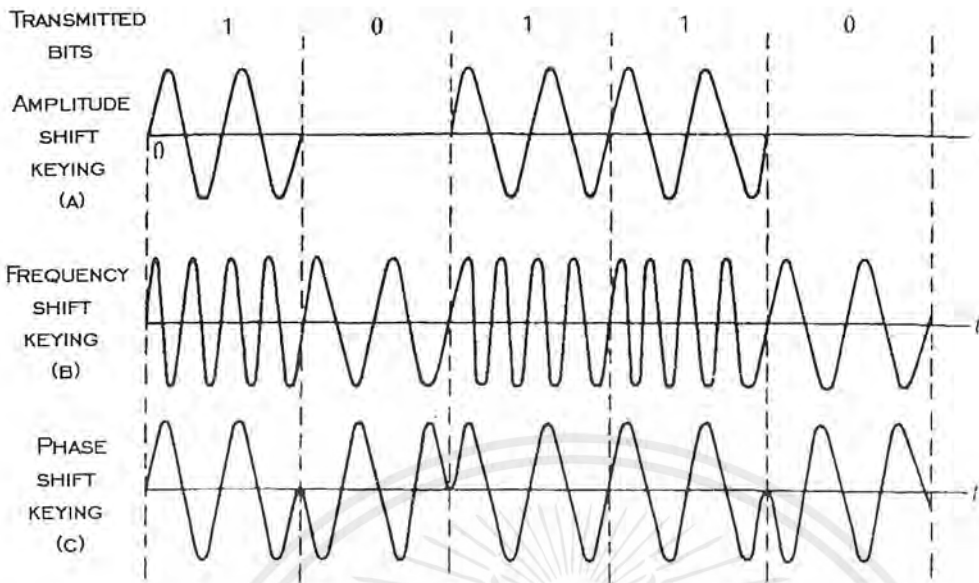
รูปที่ 4.2 หลักการของการรับแบบแสงออปติคัล (Coherent optical receiver)

พิจารณาแผนผังของระบบการสื่อสารทางแสงผ่านเส้นใยแก้วแบบออปติคัล ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3 เส้นประที่ล้อมรอบจะเป็นการแสดงถึงความแตกต่างของระบบออปติคัลกับระบบตรวจจับโดยตรง เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ที่มีโลคัลออสซิลเลเตอร์ที่ด้านส่งที่แสดงในรูปจะทำหน้าที่เป็นตัวต้นความถี่ทางแสง (Optical frequency oscillator) การมอดูเลตภายนอกโดยปกติจะให้แอมพลิจูดซฟิคียอิง ฟริควนซีซฟิคียอิง หรือ เฟสซฟิคียอิง ของสัญญาณพาหะ (Carrier) โดยสัญญาณข้อมูล การมอดูเลตภายในโดยการมอดูเลตของกระแสขั้วเลเซอร์ก็อาจจะทำได้ อย่างไรก็ตามก็ยังคงให้ ASK หรือ FSK เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.3 ระบบออปติคัลทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นพาหะมอดูเลตที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลฐานสอง

ซึ่งรูปแบบลักษณะคลื่นสำหรับเทคนิคการมอดูเลตพื้นฐาน 3 แบบของพาหะมอดูเลตด้วยข้อมูลแบบฐานสองจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

โดยรูปที่ 4.4 a) จะแสดงลักษณะของการมอดูเลตแบบแอมพลิจูดซีฟิเคชัน โดยการมอดูเลชันแบบนี้จะถูกใช้ในระบบการตรวจจับสัญญาณโดยตรงด้วย ในการรับสัญญาณจะแบ่งสัญญาณเลขฐานสองที่เป็นศูนย์และหนึ่ง โดยความเข้มของสัญญาณที่ตกกระทบตัวตรวจจับสัญญาณแสง การมอดูเลชันแบบแอมพลิจูดซีฟิเคชันจะมีปัญหาบางประการคือเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ไม่สามารถที่จะคงความเสถียรภาพของความถี่เอาต์พุตเมื่อทำการเปลี่ยนค่ากระแสขับเลเซอร์

รูปที่ 4.4 b) จะแสดงลักษณะของการมอดูเลชันแบบเฟรควเ็นซีซีฟิเคชัน การมอดูเลชันแบบนี้จะทำการแบ่งแยกสัญญาณข้อมูลเลขฐานสองศูนย์และหนึ่งด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน โดยที่แอมพลิจูดจะมีค่าคงที่

รูปที่ 4.4 c) จะแสดงลักษณะของการมอดูเลชันแบบเฟสซีฟิเคชัน การมอดูเลตสัญญาณในลักษณะนี้จะแบ่งสัญญาณข้อมูลเลขฐานสองศูนย์และหนึ่งด้วยการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณ โดยค่าแอมพลิจูดของสัญญาณจะมีค่าคงที่เช่นเดียวกับเฟรควเ็นซีซีฟิเคชัน

เมื่อพิจารณาคลื่นสัญญาณ (Signal wave) และการสั่นเฉพาะที่ (Local oscillator) ที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้นในทิศทางเดียวกัน จะมีสมการคลื่นดังนี้

$$E_s = E_s \exp\{j[\omega_s t + \phi_s(t)]\} \quad (4.1)$$

$$E_l = E_l \exp\{j[\omega_l t + \phi_l(t)]\} \quad (4.2)$$

ที่ซึ่ง  $E_s$  และ  $E_l$  คือพลังงานของคลื่นสัญญาณและคลื่นการสั่นเฉพาะที่

$\omega_s$  และ  $\omega_l$  คือความถี่เชิงมุมทางแสง (Optical angular frequency) ของสัญญาณและความถี่เชิงมุมทางแสงของการสั่นเฉพาะที่

$\phi_s$  และ  $\phi_l$  คือเฟสทางแสงของสัญญาณ (Optical phase) และเฟสทางแสงของการสั่นเฉพาะที่

การรวมกันของคลื่น 2 สัญญาณนี้จะถูกทำในตัวรวมลำคลื่น (Beam combiner) และมีโฟโตไดโอด ทำหน้าที่รับสัญญาณและจะให้กระแสที่สอดคล้องกับกำลังของคลื่นที่รวมกันและถ้าพิจารณาให้เฟสทางแสงของสัญญาณมีค่าเป็น  $\phi$  และค่าเฟสทางแสงของการสั่นเฉพาะที่มีค่าเป็นศูนย์ ค่ากระแสที่ได้จากการรวมกันจะเป็นดังสมการ

$$I \propto (E_s + E_l)(E_s + E_l)^* \quad (4.3)$$

เมื่อแทนสมการ (4.1) และ (4.2) ลงไปจะได้

$$\begin{aligned} (E_s + E_l)(E_s + E_l)^* &= E_s^2 \cos^2(\omega_s t + \phi) + E_l^2 \cos^2(\omega_l t) + 2E_s E_l \cos(\omega_s t + \phi) \cos(\omega_l t) \\ &= \frac{1}{2} E_s^2 + \frac{1}{2} E_s \cos(2\omega_s t + \phi) + \frac{1}{2} E_l^2 + \frac{1}{2} E_l \cos(2\omega_l t) \\ &\quad + E_s E_l (\cos \omega_s t + \phi - \omega_l t) + E_s E_l (\cos \omega_s t + \phi + \omega_l t) \end{aligned} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 นำเอาเทอมที่มีความถี่สูงซึ่งจะอยู่นอกเหนือจากการตอบสนองของตัวตรวจจับแสงออก (นั่นหมายถึงจะไม่ปรากฏที่เอาท์พุท) และเขียนอยู่ในรูปของกำลังแสงจะได้สมการ

$$= P_s + P_l + 2\sqrt{P_s P_l} \cos[(\omega_s - \omega_l)t + \phi] \quad (4.5)$$

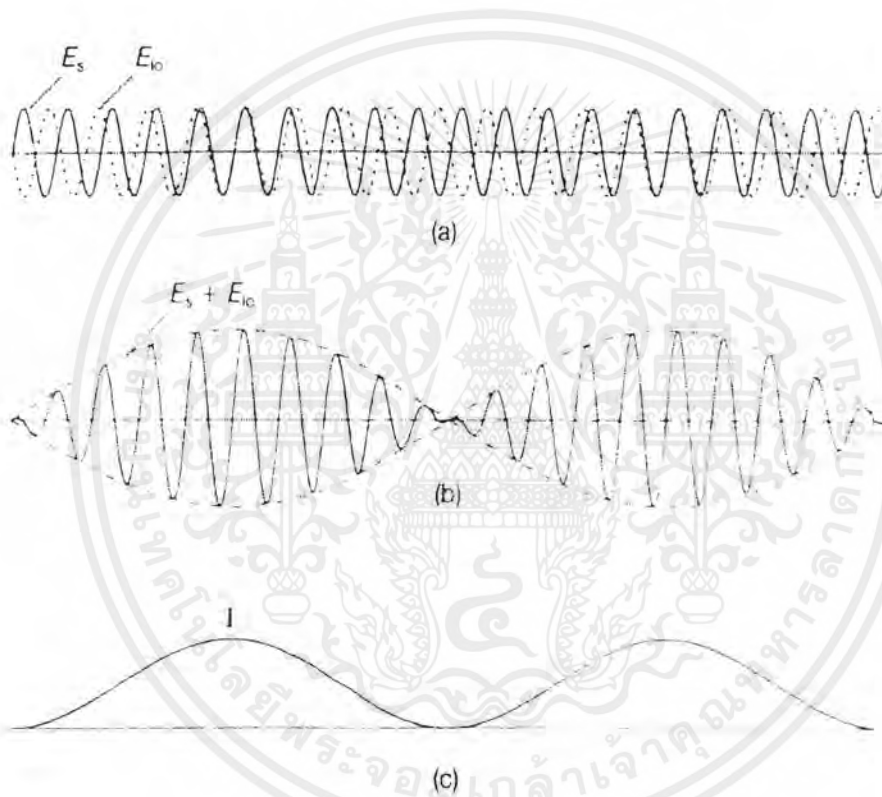
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.5) เทอมแรก  $P_s$  จะเป็นกำลังของสัญญาณและเทอมที่สอง  $P_r$  จะเป็นกำลังของตัวส่งเฉพาะที่ ส่วนในเทอมที่สามจะเป็นเทอมที่มีความสำคัญเพราะว่ารวมข้อมูลของสัญญาณที่ได้รับทั้งหมดกล่าวคือแอมพลิจูด  $\sqrt{P_s}$  ความถี่  $\omega_s$  และเฟส  $\phi(t)$  ขนาดของเทอมที่สามสามารถที่จะเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มกำลังของการส่งเฉพาะที่  $P_r$  และเมื่อการส่งเฉพาะที่ถูกล็อกเฟส (phase-locked) ไปยังคลื่นสัญญาณ เทอมที่สามนี้จะแสดงลักษณะของสัญญาณพื้นฐาน (Baseband) การรับสัญญาณในลักษณะนี้จะถูกเรียกว่าการรับแบบโฮโมไดน์ ส่วนในกรณีที่ไม่มีการล็อกเฟส เทอมที่สามจะเป็นสัญญาณ ไอเอฟ (Intermediate frequency ,IF) สัญญาณ ไอเอฟ โดยปกติแล้วจะอยู่ในช่วงของความถี่คลื่นวิทยุ(Radio frequency) หรืออาจจะในช่วง 20 ถึง 30 หรือ 200 ถึง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ และการรับสัญญาณแบบนี้จะเรียกว่าเฮเทอโรไดน์ สังเกตตัวอย่างตามรูปที่ 4.5 รูป a) เส้นที่ไม่ใช่เส้นประจะแทนสนามไฟฟ้า  $E_s$  ของสัญญาณทางแสงที่ถูกรับ และเส้นประจะแทนสนามไฟฟ้า  $E_r$  ของเลเซอร์การส่งเฉพาะที่ เพื่อให้เห็นความชัดเจนสำหรับแผนภาพนี้นั้นจะให้เทอมของการรบกวนเฟส  $\phi_0(t)$  และ  $\phi_r(t)$  มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในช่วงเวลาในรูปจะบรรจุคลื่นสัญญาณที่มี 20 รอบ (Cycle) และ 18 รอบสำหรับการส่งเฉพาะที่ ในรูป b) จะแสดงผลรวมของคลื่นทั้งสอง (เส้นที่ไม่ใช่เส้นประ) และเส้นประจะแทนส่วนที่ห่อหุ้มของผลรวมนี

ซึ่งส่วนที่ห่อหุ้มนี้จะเป็น 1 รอบในช่วงเวลาเดียวกัน ผลรวมของคลื่นนี้จะมีผลต่อโฟโตไดโอด และจะผลิตกระแสโฟโตที่ซึ่งแปรผันตรงกับกำลังของคลื่น  $E_s + E_r$  ซึ่งกำลังนี้จะเปลี่ยนไปในลักษณะแปรผันตรงกับกำลังสองของส่วนที่ห่อหุ้มของคลื่น ดังนั้นกระแสโฟโตไดโอดที่แสดงในรูป c) จะบรรจุส่วนประกอบฮาร์โมนิกความถี่ของส่วนที่ห่อหุ้มในรูป b) สรุปว่าในตัวอย่างที่ให้นี้มีความหมายว่าความถี่ที่ได้นี้คือความแตกต่างกันของความถี่ของการส่งเฉพาะที่กับความถี่ของสัญญาณ

การมอดูเลชันคลื่นแสงที่จะถูกส่งสามารถที่จะทำได้ทั้งโดยทางตรงด้วยการใช้กระแสขับเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ หรือโดยทางอ้อมด้วยการใช้ตัวมอดูเลตภายนอก (External Modulator) แม้ว่าการมอดูเลตโดยทางตรงเหมือนจะเป็นทางเลือกแรกสำหรับการมอดูเลตแบบเอเอ็มก็ตาม แต่ก็มีความเสี่ยงเปรียบอย่างมาก นั่นคือการมอดูเลตกระแสขับนั้นจะไม่เพียงแต่เป็นการมอดูเลตกำลังของแสงเท่านั้นแต่ยังจะมอดูเลตความถี่ของแสงเลเซอร์ด้วย ความถี่นี้จะถูกมอดูเลตประมาณ  $0.5-3 \text{ GHzm}^{-1}$  ที่ซึ่งสามารถที่จะเป็นสาเหตุของการเชิร์ป (Chirp) ที่ไม่ต้องการของความถี่ของเลเซอร์ การเชิร์ปจะทำให้การกระจาย (Dispersion) มีมากยิ่งขึ้นในเส้นใยแก้วและจะเป็นปัญหาอย่างมากในการรับสัญญาณแบบออปติคัล เนื่องจากความถี่ไอเอฟที่ไม่สามารถกำหนดได้ การมอดูเลตความถี่โดยทางตรงเป็นวิธีง่าย ๆ ที่สามารถทำได้ การมอดูเลตกระแสเล็ก ๆ สามารถที่จะให้การมอดูเลตความถี่ที่สัมพันธ์กันได้อย่างมาก ขณะที่แอมพลิจูดของการมอดูเลตยังคงมีขนาดเล็ก การมอดูเลตภายนอกดูเหมือนจะเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับเอเอ็มและพีเอ็ม และวิธีการบางอย่างสำหรับการมอดูเลตภายนอกได้ถูกพัฒนาขึ้นมา ไม่ว่าจะเป็นการใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำหรือแก้ว อย่างเช่น  $\text{LiNbO}_3$  การเลือกสารเป็นเอไอสารที่ส่งผ่านไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่น่าจะเหมาะไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูเลตความเข้มอาจจะมีพื้นฐานมาจากปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์อย่างหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้า เช่นที่เกี่ยวกับ การสูญเสีย ทิศทางการควบคุมของตัวนำคลื่นแสง (Wave guide) อย่างไรก็ตามการมอดูเลตภายนอกก็ยังไม่สามารถที่จะยืนยันได้ว่าไม่มีการเชิงรูป การมอดูเลชันเฟสก็สามารถที่จะทำได้โดยการเปลี่ยนดัชนีหักเหของวัสดุสารกึ่งตัวนำ หรือตัวนำคลื่น  $\text{LiNbO}_3$  ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse electric field) ที่จ่ายให้โดยทางอิเล็กโทรดด้านหนึ่งของตัวนำคลื่น



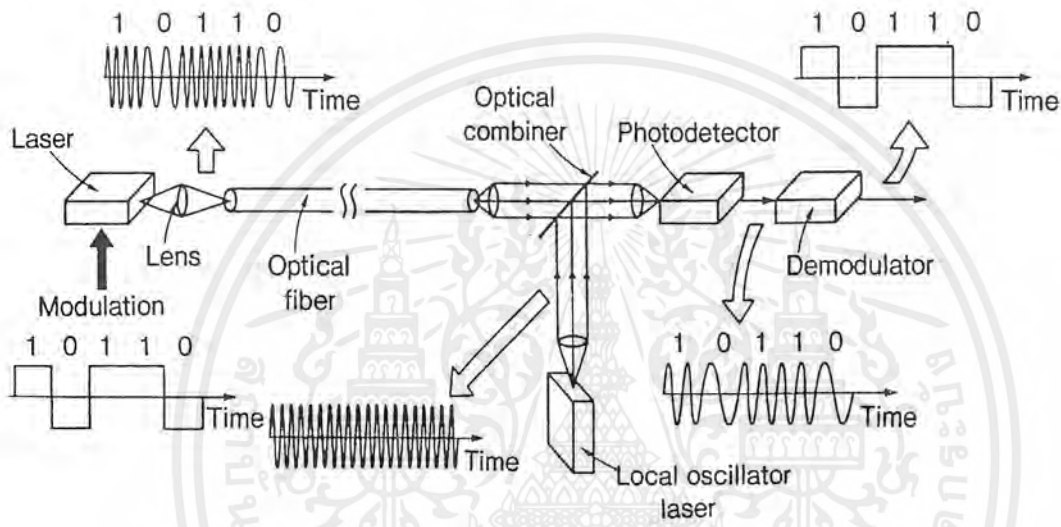
รูปที่ 4.5 การผสมกันของคลื่นแสง  $E_s$  และ  $E_{i0}$  a) คลื่น 2 คลื่น  $E_s$  และ  $E_{i0}$  b)  $E_s + E_{i0}$  c) กระแสโฟโตไดโอด

อุณหภูมิของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ก็มีส่วนสำคัญ โดยที่จะต้องมีความเสถียรภาพเพราะว่าความถี่จะความไวต่ออุณหภูมิมากในช่วง  $10 - 20 \text{ GHz K}^{-1}$

เนื่องจากมีสิ่งจำเป็นที่ต้องกำหนดมากสำหรับคลื่นแสงอาพันธ์ที่จะทำการรับ ทำให้มีเพียงเส้นใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดียวเท่านั้นที่สามารถที่จะใช้ได้ในระบบการตรวจจับสัญญาณแบบอาพันธ์ ระบบอาพันธ์จะให้แบนด์วิธในการส่งสัญญาณกว้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความยาวคลื่นที่ใช้ในช่วงที่ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่ไม่มีกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้นในรูปที่ 4.6 จะแสดงถึงโครงสร้างของระบบออปติกและแสดงลักษณะของสัญญาณที่จุดต่างๆของระบบ โดยเริ่มตั้งแต่สัญญาณก่อนส่งเข้าเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งสังเกตได้ว่าสัญญาณข้อมูลที่จะทำการส่งเข้าเส้นใยแก้วนำแสงจะมีความถี่ที่สูง และเมื่อสัญญาณข้อมูลนี้ออกจากเส้นใยแก้วนำแสงก็จะถูกรวมเข้ากับสัญญาณที่มาจาก การสั่นเฉพาะที่ สัญญาณที่ได้จากการรวมจะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับสัญญาณแสง โดยที่สัญญาณที่ถูกตรวจจับจะเป็นสัญญาณ ไอเอฟที่มีความถี่ต่ำ จากนั้นก็จะถูกคิมอดูเลตด้วยตัวคิมอดูเลเตอร์ไปเป็นสัญญาณพื้นฐาน



รูปที่ 4.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบออปติก (Coherent system) และสัญญาณที่จุดต่างๆ

#### 4.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการรับสัญญาณทางแสงแบบออปติก

สำหรับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน จะพบว่าเทอมที่สามของสมการ 4.5 เป็นส่วนที่น่าสนใจมากเนื่องจากจะอ้างถึงสัญญาณข้อมูลและพาหะ แม้ว่าเทอมทั้งหมดจะทำให้มีซีคอนอยด์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสัญญาณมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์แล้วค่าเฉลี่ยของสัญญาณซีคอนอยด์ก็สามารถที่จะถูกกำหนดโดยเทอมที่สองของสมการ 4.5 นั่นก็คือพลังงานของการสั่นเฉพาะที่ได้

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับการตรวจจับสัญญาณแบบเฮตเทอโรไดต์อุดมคติ (Ideal) เมื่อกำลังของการสั่นเฉพาะที่มีค่ามาก จะแสดงได้ดังสมการ 4.6

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{het-lim}} = \frac{\eta P_s}{hf 2B} = \frac{\eta P_s}{hf B_{IF}} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 4.6 จะให้ค่าขอบเขตช้อตนอยด์ (Shot noise limit) สำหรับการตรวจจับสัญญาณทางแสงแบบเฮตเทอโรไดต์ ที่ซึ่งค่าแบนด์วิธของตัวขยายสัญญาณไอเอฟ (IF amplifier bandwidth) จะสมมุติให้มีค่าเท่ากับ  $2B$

ส่วนค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับการตรวจจับสัญญาณแบบโฮโมไดต์ทางแสงสามารถอนุมานได้จากสมการที่ 4.6 โดยการลดค่าแบนด์วิธจาก  $B_{IF}$  ไปเป็น  $B$  ตามสัญญาณเอาต์พุตจากตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ที่จะปรากฏในรูปสัญญาณพื้นฐานเมื่อใช้การตรวจจับแบบโฮโมไดต์ ซึ่งสมการของค่าอัตราส่วนนี้จะแสดงได้ดังสมการที่ 4.7

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{hom-lim}} = \frac{\eta P_s}{hfB} \quad (4.7)$$

สมการที่ 4.6 และ 4.7 จะมีพื้นฐานมาจากออน – ออฟ คีย์อิง (On – off keying ,OOK) อย่างง่าย จะพบว่าการตรวจจับสัญญาณแบบ โฮโมไดต์จะมีข้อได้เปรียบมากกว่าการตรวจจับสัญญาณแบบเฮตเทอโรไดต์ 2 ประการคือ จะเพิ่มความไวในการเชื่อมต่อและลดแบนด์วิธของตัวรับสัญญาณ

และจะสังเกตเห็นได้ว่าการใช้ระบบออปชั่น การสั้นเฉพาที่จะมีผลในการเพิ่มระดับของสัญญาณแสงโดยปราศจากผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเทอร์มัลที่เกิดโดยตัวขยายสัญญาณและค่ากระแสมืด (Dark current) จากตัวตรวจจับสัญญาณแสงซึ่งสิ่งนี้จะเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมการตรวจจับสัญญาณแบบออปชั่นจึงให้ความไวในการรับสัญญาณที่ดีกว่าการตรวจจับสัญญาณโดยตรง การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในสมการที่ 4.6 และ 4.7 นี้จะใช้สำหรับการตรวจจับสัญญาณแบบ โฮโมไดต์และเฮตเทอโรไดต์ ที่มีอคูเลตแบบ ASK

#### 4.3 การตรวจจับสัญญาณแบบเฮตเทอโรไดต์ (The heterodyne detection)

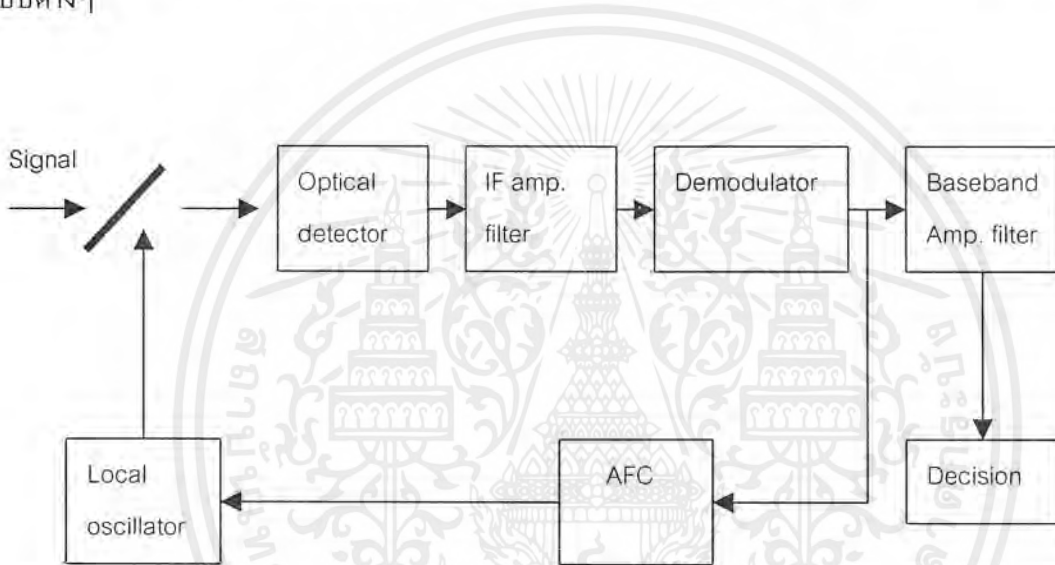
ในการตรวจจับสัญญาณทางแสงแบบเฮตเทอโรไดต์จำเป็นต้องประมาณค่าเฟสของสัญญาณไอเอฟเพื่อที่จะแปลงตัวสัญญาณนี้ไปสู่สัญญาณพื้นฐาน เพราะว่าสัญญาณข้อมูลจะถูกปฏิบัติการด้วยพาหะไอเอฟ ซึ่งในการมอดูเลตแบบ PSK นั้นการประมาณค่าเฟสทางไฟฟ้าก็จะถูกนำมาใช้ เพราะฉะนั้นเทคนิควงล้อเฟส (Phase locked loop, PLL) เป็นประโยชน์อย่างมากและโครงสร้างที่เหมาะสมกับการสื่อสารความถี่คลื่นวิทยุ (Radiofrequency) และไมโครเวฟก็สามารถนำมาใช้ได้ ดังนั้นเทคนิคนี้ใช้สำหรับการดีมอดูเลตแบบ PSK ที่ซึ่งต้องมีการประมาณค่าของเฟสของสัญญาณ สรุปว่าในการที่จะทำการวัดเฟสของสัญญาณที่มอดูเลตแบบ PSK นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับเฟสอ้างอิงจากเฟสของสัญญาณแสงเฉลี่ยที่เข้ามาภายในช่วงเวลาจำเพาะ ดังนั้นจุดมุ่งหมายของวิธีการ PLL คือให้การอ้างอิงที่ซึ่งโดยทั่วไป ค่าเวลาเฉลี่ยเวลานั้นจะถูกกำหนดโดยแบนด์วิธของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปการตรวจจับแบบเฮตโทโรดายต์นั้น ค่าความถี่ของสัญญาณข้อมูลแสง (Signal light) กับความถี่ของแสงการสั่นท้องถิ่น (Local oscillator light) จะมีค่าไม่เท่ากัน  $\omega_s \neq \omega_l$  นั่นคือค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ตรวจจับได้จะได้ในสมการ

$$i = P_s + P_l + 2\sqrt{P_s P_l} \cos[(\omega_s - \omega_l)t + \phi] \quad (4.8)$$

ซึ่งในเทอมของความถี่เชิงมุม (angular frequency)  $\omega_s - \omega_l$  จะถูกเรียกว่า จังหวะของสัญญาณ (Beat signal) และข้อมูลที่จะส่งไปจะถูกบรรจุอยู่ในจังหวะของสัญญาณ ในการมอดูเลชันแบบต่างๆ



รูป 4.7 แสดงลักษณะโครงสร้างโคเดแกรมของการตรวจจับแบบเฮตโทโรดายต์

จากรูปที่ 4.7 จะแสดงลักษณะโครงสร้างของระบบการตรวจจับแบบเฮตโทโรดายต์ เมื่อสัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณการสั่นเฉพาะที่ตกกระทบที่ตัวตรวจจับแสงจะเกิดสัญญาณในลักษณะของสัญญาณไอเอฟขึ้น จากนั้นนำสัญญาณไอเอฟมาผ่านตัวกรองสัญญาณ (IF Filter) เพื่อให้ได้สัญญาณในช่วงที่ต้องการ แล้วไปทำการดีมอดูเลตออกมาเป็นสัญญาณพื้นฐาน ซึ่งค่าสัญญาณไอเอฟจะมีการผันแปรได้ การผันแปรนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของการรับสัญญาณลดลง ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพของความถี่จะต้องทำการย้อนกลับ (Feed back) สัญญาณจากตัวดีมอดูเลเตอร์ไปยังตัวควบคุมความถี่อัตโนมัติ (Automatic frequency control, AFC) แล้วส่งต่อไปยังวงจรจับตัวสั่นเฉพาะที่เพื่อให้สัญญาณไอเอฟมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การตรวจจับสัญญาณแบบโฮโมไดนาญ์ (The homodyne detection)

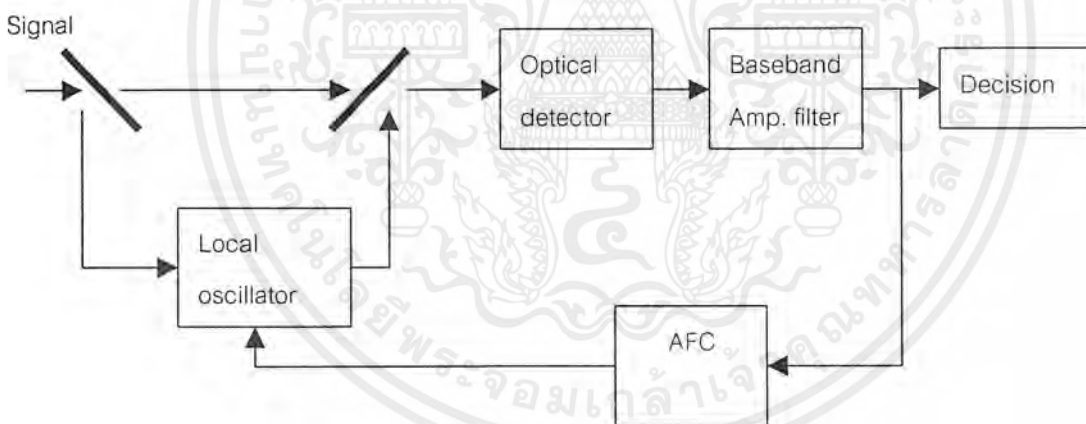
การตรวจจับสัญญาณแบบโฮโมไดนาญ์ของสัญญาณข้อมูลต้องการเทคโนโลยีที่มีชำนาญมากกว่าการตรวจจับแบบเฮเทอโรไดนาญ์เพราะมีความจำเป็นในการล็อกเฟสของแสงการส่งที่ตรงกับสัญญาณแสงที่จะรับ ซึ่งวงจรถักเฟสทางแสง (Optical phase – locked loop (OPLL)) เป็นสิ่งที่ยากในการที่จะทำในระบบที่ใช้เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ให้มีความถี่เท่ากัน

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าสัญญาณที่ได้จากการรวมสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณการส่งเฉพาะที่นั้นเป็นสัญญาณพื้นฐาน ทำให้ในระบบของโฮโมไดนาญ์ไม่จำเป็นต้องมีตัวมอดูเลเตอร์ ส่วนตัวควบคุมความถี่อัตโนมัติจะทำหน้าที่ในการควบคุมเสถียรภาพของความถี่ระหว่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณการส่งเฉพาะที่

ซึ่งค่าของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ตรวจจับได้จะเขียนอยู่ในสมการ

$$i = P_s + P_l + 2\sqrt{P_s P_l} \cos[\phi_m(t) + \phi] \quad (4.9)$$

ที่ซึ่ง  $\phi_m$  คือการเปลี่ยนเฟส (Phase change) เนื่องจากการมอดูเลต



รูป 4.8 แสดงลักษณะ โครงสร้างโคอะแกรมของการตรวจจับแบบ โฮโมไดนาญ์

#### 4.5 คุณสมบัติของระบบออปชัน

ในระบบออปชันจะต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงควรมีความถี่ที่คงที่ ซึ่งเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semiconductor laser) จะถูกเลือกให้ใช้ในระบบออปชัน
2. ทั้งแอมพลิจูดและเฟสของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์เป็นการรบกวน (noisy) ซึ่งการรบกวนนี้จะลดอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal – to – noise ratio) และ

ลดประสิทธิภาพของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สำหรับระบบโฮโมไดน์ จะต้องมียวจรล็อกเฟสที่มีความกว้างช่วงแบนด์วิธขนาดใหญ่ และมีไลดวิธแคบ (Small laser linewidth) สำหรับระบบเฮเทอโรไดน์การล็อกความถี่ (Frequency – locking) ก็เป็นสิ่งเพียงพอ
4. เนื่องจากไลดวิธของเลเซอร์ที่มีค่าน้อยจะรักษาความบริสุทธิ์ของสเปกตรัมเพราะป้องกันการสะท้อนกลับได้
5. การขยายสัญญาณที่ได้รับโดยการสั่นเฉพาะที่ (Local oscillator) จะได้ผลเมื่อ สถานะการโพลาไรซ์ของทั้งสองคลื่นซ้อนกันพอดี

## 4.6 องค์ประกอบที่สำคัญในระบบออปชั่น

### 4.6.1 เลเซอร์

หลักการเกิดเลเซอร์อย่างง่าย จะพิจารณาการส่งผ่าน (Transition) ของอิเล็กตรอนที่ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างระดับชั้นพลังงาน 2 ระดับ ดังรูปที่ 4.9 ถ้าอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำกว่า  $E_1$  ดังนั้นเมื่อมีโฟตอนพลังงาน ( $E_2-E_1$ ) เข้ามา มันอาจจะกระตุ้นอิเล็กตรอนไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า  $E_2$  โดยการดูดซับโฟตอนที่เข้ามา ในอีกทางหนึ่งถ้าอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับ  $E_2$  อาจจะย้อนกลับมาสู่ระดับสถานะพื้น (Ground state) ด้วยการปลดปล่อยรังสีโฟตอนออกมา กระบวนการปลดปล่อยรังสีอาจจะเกิดขึ้นได้ 2 วิธีที่แตกต่างกัน คือ

- a) กระบวนการปล่อยรังสีแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous emission process) ที่ซึ่งอิเล็กตรอนจะตกไปสู่ระดับพลังงานต่ำกว่าในทิศทางสุ่มทั้งหมด
- b) กระบวนการปล่อยรังสีที่ถูกกระตุ้น (Stimulated emission process) ที่ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกยิงไปโดยการได้รับการส่งผ่านโฟตอนพลังงาน ( $E_2-E_1$ )

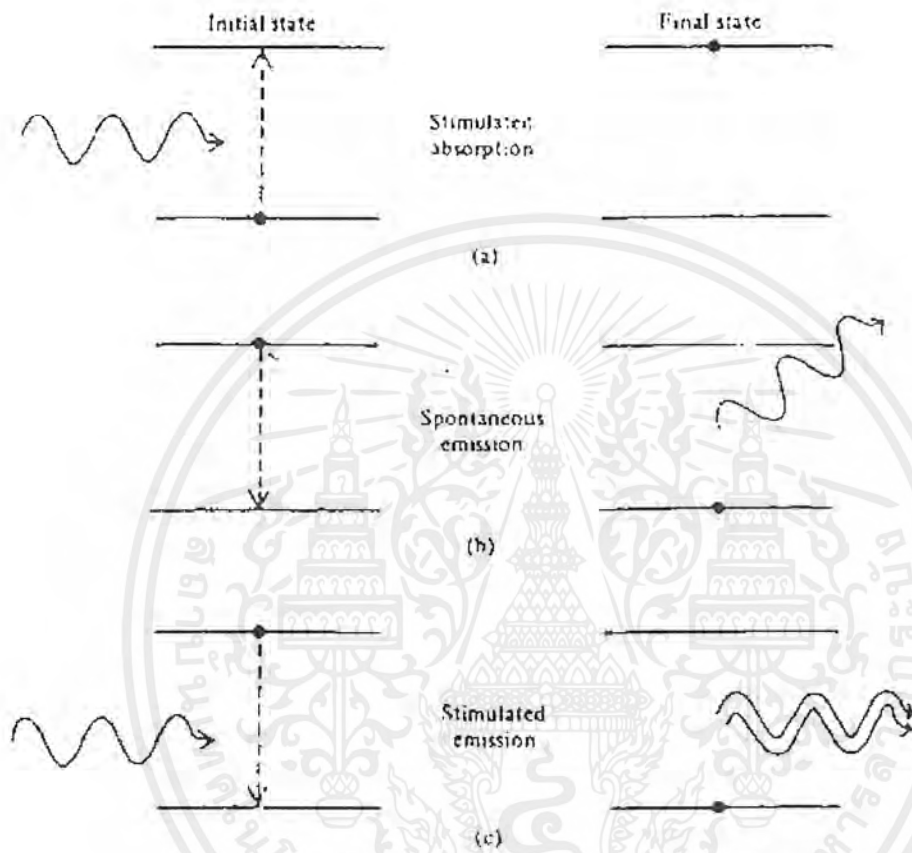
รังสีที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous radiation) จากอะตอมต่างๆจะถูกปลดปล่อยออกมาแบบสุ่ม นั่นคือรังสีจะถูกปล่อยออกมาโดยอะตอมจำนวนมากจะเป็นลักษณะไม่อาพันธ์ (Incoherent) ในทางตรงข้ามกระบวนการปล่อยรังสีที่ถูกกระตุ้นจะให้ผลลัพธ์เป็นแบบรังสีอาพันธ์ (Coherent) เพราะว่คลื่นจะเกี่ยวเนื่องกับการกระตุ้นของโฟตอนที่ทำการกระตุ้นที่มีความถี่เดียวกัน

#### 4.6.1.1 เลเซอร์สำหรับระบบออปชั่น (Lasers for Coherent systems)

ระบบการสื่อสารด้วยคลื่นแสงอาพันธ์ สามารถที่จะได้รับประโยชน์ต่างๆมากมายเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ IM – DD (Intensity modulation direct detection) ใดๆก็ตามระบบออปชั่นนั้นต้องการอุปกรณ์ทางแสงที่มีความทันสมัย เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์สำหรับการส่งสัญญาณและการสั่นเฉพาะที่จะเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับวิธีนี้เพราะว่าระบบออปชั่น (Coherent system) ต้องการแหล่งกำเนิดที่มีลักษณะที่ดี เช่น ความบริสุทธิ์ของสเปกตรัม (Spectral purity) และความเสถียรภาพ (Stability) ต้องดีมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ไดโอดที่ซึ่งถูกเลือกให้ใช้ในระบบการสื่อสารแบบออปติก



รูป 4.9 แสดงกระบวนการพื้นฐาน 3 กระบวนการของการเปลี่ยนระดับพลังงาน ระหว่าง 2 ระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  จุดสีดำแสดงถึงสถานะของอะตอม สภาวะเริ่มต้นจะอยู่ทางด้านซ้าย : สภาวะสุดท้ายหลังจากกระบวนการเกิดขึ้นจะอยู่ทางด้านขวา (a) การดูดซับ (b) การปล่อยรังสีแบบเกิดขึ้นเอง (c) การปล่อยรังสีแบบกระตุ้น

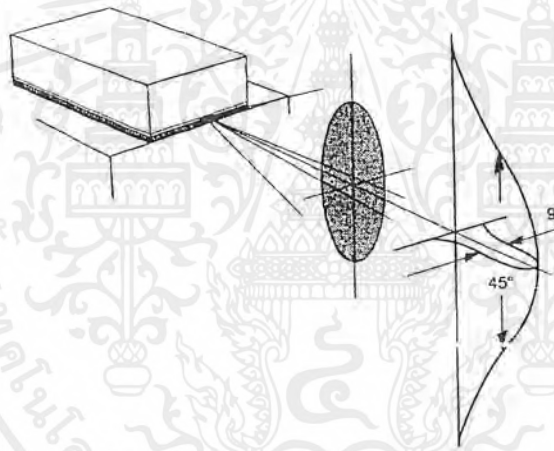
### เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ไดโอด (Semiconductor laser diode)

ในเลเซอร์ไดโอดจะมีหลักการคล้ายกับเลเซอร์ปกติ แต่ก็มีข้อแตกต่างบางประการที่สำคัญคือ

- ในเลเซอร์ปกติทั่วไป การส่งผ่านทางควอนตัม (Quantum transition) จะเกิดขึ้นที่ระหว่างระดับพลังงานที่แยกจากกัน แต่ทว่าในเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ การส่งผ่านจะเกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติของแถบของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- b) เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะมีขนาดเล็ก เพราะว่าช่วงบริเวณแอกทีฟ (Active region) จะแคบมาก การเบนออก (Divergence) ของลำเลเซอร์จะกว้างกว่าในเลเซอร์ทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 4.10
- c) ลักษณะของแถบแสง (spectral) ของเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์จะขึ้นกับคุณสมบัติของรอยต่อตรงกลาง (Junction medium) [เช่น ช่องว่างพลังงาน และ คีซีนิกหักเห]
- d) สำหรับเลเซอร์แบบรอยต่อพี – เอ็น (p – n junction laser) เลเซอร์จะถูกทำให้เกิดโดยการผ่านกระแสไปข้างหน้า (Forward current) ธรรมดาเข้าสู่ไดโอดระบบนี้จะมีประสิทธิภาพโดยรวมมากเพราะว่าสามารถทำการ โมดูเลตได้ง่าย โดยการ โมดูเลตที่กระแส และเนื่องจากเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์มีช่วงชีวิตของโฟตอนสั้น ดังนั้นการมอดูเลตที่ความถี่สูงก็สามารถทำได้



รูป 4.10 แสดงการปล่อยรังสีของสนามระยะไกลของเลเซอร์ โครงสร้างวิวิธพันธุ์คู่ (Double – Heterostructure laser)

#### 4.6.2 ตัวรับสำหรับระบบออปติคัล (Receivers for coherent systems)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าระบบการสื่อสารที่ตัวรับทางด้านท้ายที่สัญญาณข้อมูลและพาหะจะถูกกลับคืนสภาพอย่างเดิมโดยการตรวจจับกำลังงานของคลื่นแสงที่ซึ่งได้รับมา ชนิดของการตรวจจับนี้จะถูกเรียกว่าการตรวจจับโดยตรง และระบบที่ปฏิบัติการด้านนี้จะเรียกว่าระบบการตรวจจับความเข้มการมอดูเลตโดยตรง (Intensity modulate direct detection)

ถ้าคลื่นแสงที่ได้รับถูกผสมด้วยแสงที่มาจากเลเซอร์การสั่นเฉพาะที่ สัญญาณ IF จะถูกสร้างขึ้นมาเมื่อการสั่นเฉพาะที่มีความถี่ที่แตกต่างกันจากเลเซอร์ที่ส่ง ที่ซึ่งสัญญาณไอเอฟจะมีทั้งข้อมูลเกี่ยวกับเฟสและความถี่ของสัญญาณส่ง (Transmitted signal) การรับแบบนี้เรียกว่า การรับเอกลำเป็นเอกลำที่ส่งวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเฮตโรไดน์ และจะเรียกว่าการรับแบบโฮโมไดน์ (Homodyne reception) เมื่อการสั่นเฉพาะที่ (Local oscillator) มีเฟสที่สอดคล้องกันกับเลเซอร์ที่ส่ง (Transmitter laser) การรับแบบโฮโมไดน์ทางแสงจะเป็นเทคนิคที่มีความยากมากในการจัดเครื่องมือ เพราะเหตุผล 2 ประการคือ ประการแรก ระบบนี้ต้องการความแม่นยำในการเข้ากันได้ของหน้าคลื่น (Wavefront) และประการที่สองคือแบบวิคซ์ของวงจรถอดเฟส (Phase - locked loop) และโลจิกของเลเซอร์เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก

ในระบบการตรวจรับแบบเฮตโรไดน์ออปติคัล ค่าช่วงแบนด์วิธนั้นควรเป็นสองเท่าของการตรวจรับโดยตรงเพราะว่าในการรับแบบโดยตรงนั้น ค่าช่วงแบนด์วิธที่ต้องการนั้นจะมีค่าไม่มากไปกว่าอัตราของระบบข้อมูลเนื่องมาจากว่าระบบการตรวจรับความเข้มการมอดูเลตโดยตรงจะรับเพียงแค่อัตราสัญญาณพื้นฐานเท่านั้น แต่ในแบบเฮตโรไดน์จะเป็นลักษณะของสัญญาณไอเอฟที่มีช่วงของแถบข้างด้านบน (Upper side band) และแถบข้างด้านล่าง (Lower side band) ส่วนค่าแบนด์วิธสำหรับระบบการตรวจรับแบบโฮโมไดน์ออปติคัล จะเป็นค่าช่วงแบนด์วิธของแบนด์วิธสัญญาณพื้นฐาน เช่นเดียวกับในกรณีของการรับแบบโดยตรง

ในการตรวจรับแบบออปติคัลต้องมีลักษณะของสัญญาณรบกวนต่ำ ซึ่งตามปกติแล้วเป็นสิ่งที่ยากที่จะปฏิบัติ

การตรวจรับแบบออปติคัลมีประโยชน์หลัก 2 ประการ คือ

1. มีความสามารถในการแยกคลื่นหรือความถี่สูงกว่า (Higher selectivity)
2. มีความไวมากกว่า (More sensitivity)

ข้อเสียของระบบออปติคัล ก็คือการทำวงจรการรับสัญญาณจะเป็นสิ่งที่ค่อนข้างซับซ้อนมาก

#### 4.6.2.1 โฟโตไดโอด (Photodiode)

ตัวตรวจรับทางแสงเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบการสื่อสารทางแสง ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณทางแสงไปเป็นสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้า สิ่งจำเป็นที่สำคัญของตัวตรวจรับก็คือ

- a) มีความไวสูงในช่วงของความยาวคลื่นที่ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงทำงาน
- b) มีความกว้างแถบความถี่ที่เพียงพอ และความเร็วของการตอบสนอง
- c) มีสัญญาณรบกวนส่วนเกินน้อยจากตัวตรวจรับ
- d) มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำ

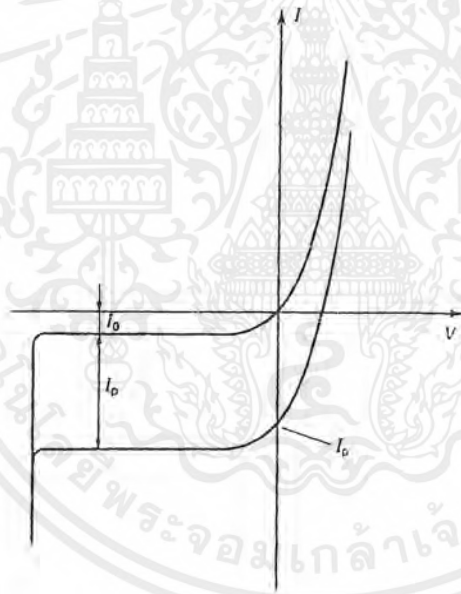
ซึ่งเซมิคอนดักเตอร์โฟโตไดโอดจะมีสิ่งสำคัญอันนี้ทั้งหมด รวมทั้งมีขนาดเล็กกระทัดรัด และราคาถูก ในรูปที่ 4.11 จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ของโฟโตไดโอดภายใต้การฉายแสงและขณะที่ยังไม่มีการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการตรวจจับพื้นฐานในเซมิคอนดักเตอร์โฟโวลต์ไดโอดจะประกอบไปด้วยการเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (Electron - hole pair) โดยโฟตอน โดยที่กระบวนการนี้จะเกิดบริเวณใกล้เคียงกับรอยต่อพี - เอ็น (p - n junction) และจะมีแบบการตรวจจับที่แตกต่างกัน 2 แบบ

-แบบโฟโวลต์ไวต์อิก (Photovoltaic mode) อิเล็กตรอนจะถูกสะสมโดยการแพร่ไปสู่ด้านหนึ่งของรอยต่อ และโฮลก็จะไปที่อีกด้านหนึ่ง สิ่งนี้จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรอยต่อ และกระแสจะไหลถ้ามีโหลด

-แบบโฟโวลต์คอนดักทีฟ (Photoconductive) โฮลจะถูกแยกออกจากอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้าสูง ดังเช่นในชั้นปลอดพาหะ (Depletion layer) ของการไบอัสย้อนกลับของรอยต่อพี - เอ็น การลอยเลื่อน (Drift) ของพาหะในชั้นปลอดพาหะจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไปสู่วงจรภายนอก



รูป 4.11 กราฟ  $I - V$  ของโฟโวลต์ไดโอด ภายใต้การฉายแสง ( $I_p \neq 0$ ) และสภาวะที่ยังไม่ฉายแสง (Dark condition) ( $I_p = 0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การออกแบบการทำงานของวงจร

ในการทำการศึกษาระบบการสื่อสารทางแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบออปติคัล จะแบ่งวงจรที่ใช้ในการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ

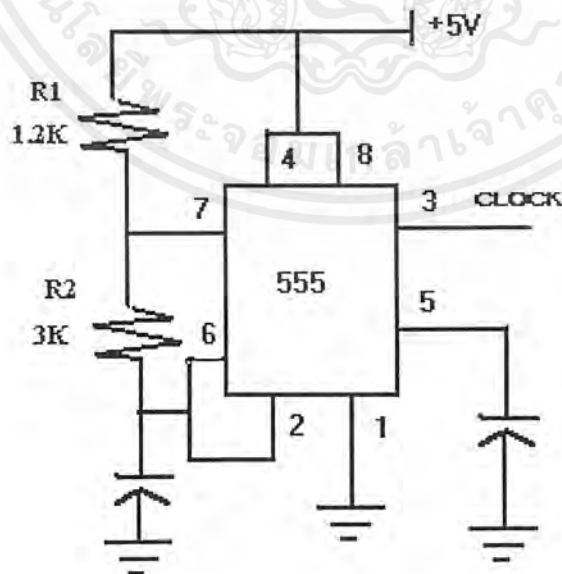
- |            |                           |
|------------|---------------------------|
| วงจรภาคส่ง | 1. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา |
|            | 2. วงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณ  |
| วงจรภาครับ | 1. วงจรตรวจจับสัญญาณแสง   |

#### 5.1 การทำงานของวงจรภาคส่ง

##### 5.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาจะใช้ IC เบอร์ 555 ซึ่งจะทำงานเป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ (Astable multivibrator) ซึ่งจะให้กำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 200 Hz ค่าความถี่นี้สามารถกำหนดได้จากค่าของอุปกรณ์ 3 ตัว คือ C1, R1 และ R2 ในรูปที่ 5.1 การคำนวณหาค่าอุปกรณ์ทั้งสามตัวสามารถทำได้จากสมการ

$$f_0 = 1.44 / (R1 + 2R2) * C1 \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการไว้ 200 Hz ในการคำนวณหาค่า  $C1, R1$  และ  $R2$  ควรจะกำหนดค่า  $C1$  ขึ้นมาก่อน เพื่อที่จะทำให้ง่ายต่อการเลือกค่า  $R1$  และ  $R2$  เพราะค่าของ  $R$  มีให้เลือกใช้มากกว่าค่าของ  $C$  และหาค่าได้ง่ายกว่า ในวงจรนี้เลือกใช้  $C1 = 1 \mu F$  ดังนั้นจะได้

$$R1 + 2R2 = 1.44 / f_0 * C1$$

$$= 1.44 / (200 * 1 \times 10^{-6})$$

$$= 7.2K$$

$$\text{Duty cycle : } D = \left( \frac{R1 + R2}{R1 + 2R2} \right) \times 100\% \quad (5.2)$$

ส่วนค่า Duty cycle จะเป็นดังสมการที่ 5.2 ในที่นี้ต้องการให้ค่า duty cycle มีค่าเป็น 50% จากสมการ พบว่า ถ้าให้  $R1$  น้อยกว่า  $R2$  มากๆ จะได้ค่า duty cycle เข้าใกล้ 50%

$$\therefore \text{เลือก } R1 = 1.2K$$

$$R2 = 3K$$

$$D = \left( \frac{1.2K + 3K}{1.2K + 2 \times 3K} \right) \times 100\%$$

$$= 58\%$$

ดังนั้นวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ คือ

$$C1 = 1 \mu F$$

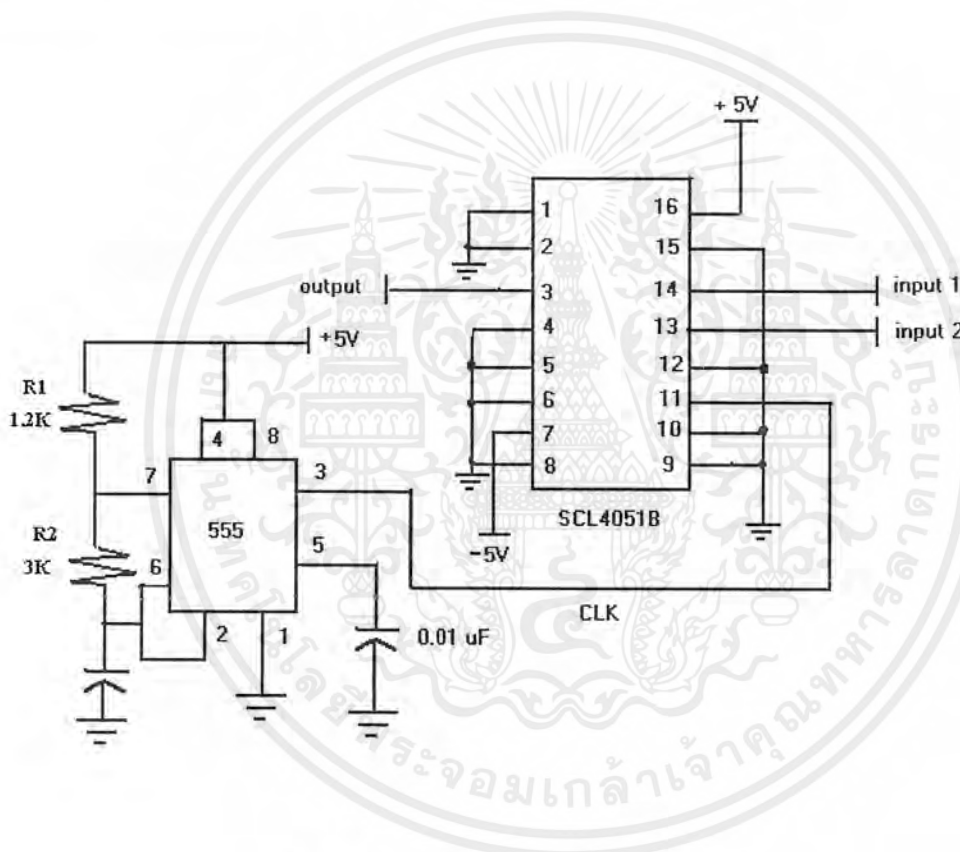
$$R1 = 1.2K$$

$$R2 = 3K1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 วงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณทางไฟฟ้า

วงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณทำหน้าที่ในการนำเอาสัญญาณอินพุตจากแหล่งกำเนิดสัญญาณหลายๆช่องอินพุตมารวมเข้าด้วยกันและให้สัญญาณเอาต์พุตออกเพียงช่องสัญญาณเดียวซึ่งสัญญาณอินพุตของช่องต่างๆจะถูกจัดให้ออกที่เอาต์พุตในเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งเทคนิคนี้เรียกว่า การมัลติเพลกซ์สัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplex) ในวงจรนี้เลือกใช้ IC เบอร์ SCL4051B ซึ่งเป็น CMOS Analog Multiplexer / Demultiplexer เป็นตัวมัลติเพลกซ์แบบ 8 ช่องสัญญาณเดี่ยว โดยมีการควบคุมการเชื่อมต่อระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตแบบเลขฐานสองที่ช่องสัญญาณ A,B,C และ Inhibit



รูปที่ 5.2 วงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณทางไฟฟ้า

วงจรมัลติเพลกซ์ทางไฟฟ้านี้จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 เนื่องจากมีการมัลติเพลกซ์สัญญาณเพียง 2 ช่องสัญญาณ เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้งานเพียง 2 ช่องสัญญาณ ซึ่งในที่นี้เลือกควบคุมอินพุตด้วยขา A ควบคุมการติดต่อสัญญาณอินพุตระหว่างช่องสัญญาณ 0 และ 1 ซึ่งทำได้โดยการนำสัญญาณนาฬิกาที่เป็นเอาต์พุตที่ขา 3 จาก IC เบอร์ 555 มาต่อกับขาที่ 11 ของ IC เบอร์ SCL4051B ซึ่งจะทำให้การตัดต่ออินพุตด้วยความถี่ 200 Hz โดยเมื่อสัญญาณนาฬิกาเป็น 0 จะทำให้ช่องสัญญาณที่ 0 หรือที่ขา 13 ทำงาน แต่เมื่อสัญญาณนาฬิกาเป็น 1 จะเกิดการตัดต่อระหว่างเอาต์พุตกับช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

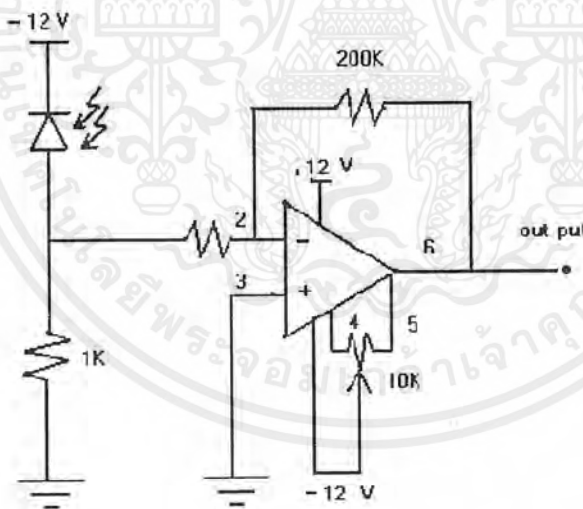
สัญญาณที่ 1 หรือที่ขา 14 ส่วนขาที่เหลือได้แก่ 1-4,12 และ 15 ก็จะต่อลงกราวด์ ที่ขา inhibit หรือที่ขา 6 จะถูกนำมาต่อลงกราวด์

สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมัลติเพล็กซ์นี้จะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรในส่วนถัดไป ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง เพื่อที่จะส่งออกไปยังใยแก้วนำแสง

## 5.2 การทำงานของวงจรภาครับ

### 5.2.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแสง

เป็นวงจรที่แปลงสัญญาณแสงจากใยแก้วนำแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้โฟโตไดโอด ตรวจจับแสงจากใยแก้วนำแสงที่ผ่านเลนส์รวมแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดของสัญญาณ เล็กมากและกลับเฟสกับข้อมูลที่ส่ง จึงมีการขยายสัญญาณให้แรงขึ้นด้วยออปแอมป์เบอร์ LM351 ที่ต่อในโหมดอินเวอร์ตติ้งซึ่งจะกลับเฟสสัญญาณที่เป็นอินพุตอีกครั้งทำให้สัญญาณมีเฟสตรงกับ สัญญาณก่อนส่งเข้าใยแก้วนำแสง และมีอัตราขยายเป็น 200 เท่า สามารถใช้ได้ในช่วงแบนด์วิดท์ 20 KHz และมีการต่อออฟเซ็ท (offset) เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เป็นกระแสดร่ง และเอาต์พุตจาก ขาที่ 6 ของออปแอมป์จะถูกนำไปทำการตีมัลติเพล็กซ์แล้วผ่านฟิลเตอร์ต่อไป



รูปที่ 5.3 วงจรตรวจจับสัญญาณแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

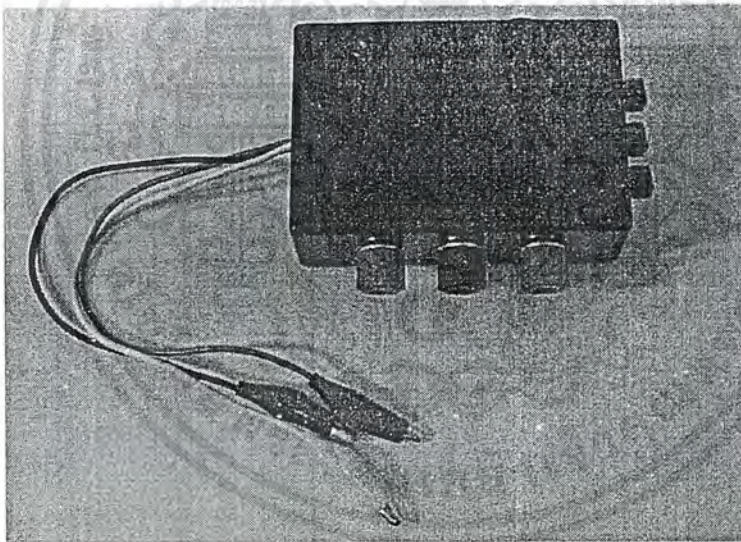
## บทที่ 6

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานในการทำการทดลองเพื่อศึกษาการขยายช่วงกว้างความถี่สื่อสารด้วยเทคนิคโคฮีเรนซ์ ซึ่งจะแบ่งลักษณะการดำเนินงานออกเป็น 2 ตอน โดยที่ตอนที่ 1 จะเป็นลักษณะของการทดลองเบื้องต้นและการศึกษาแบนด์วิธของตัวตรวจจับแสง ส่วนตอนที่ 2 จะเป็นการทดลองของสัญญาณที่มีการมอดูเลตเฟลทซ์เป็นลักษณะของบิตสุ่มและหนึ่ง

#### 6.1 การทดลองเบื้องต้น

6.1.1 ทำการต่อวงจรมอดูเลตเฟลทซ์ซึ่งประกอบเรียบร้อยแล้วจะได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 อุปกรณ์การมอดูเลตเฟลทซ์

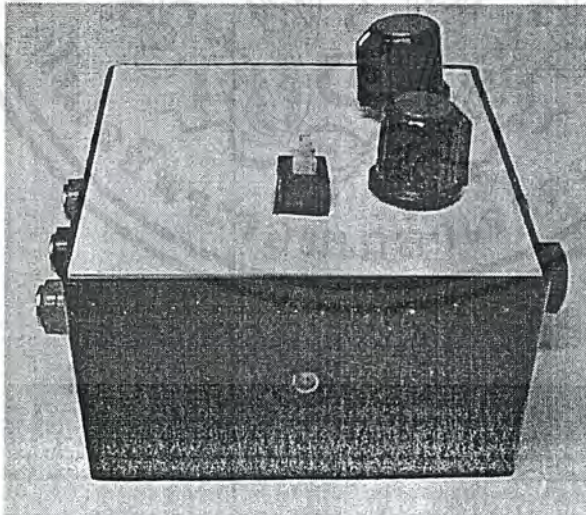
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 ศึกษาเลเซอร์เพื่อทำการมอดูเลตสัญญาณ ซึ่งในรูปที่ 6.2 แสดงอุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณเข้าเลเซอร์



รูปที่ 6.2 อุปกรณ์มอดูเลตสัญญาณเข้าเลเซอร์

6.1.3 ตัวอย่างตรวจจับสัญญาณแสงซึ่งประกอบเรียบร้อยจะได้ดังรูปที่ 6.3



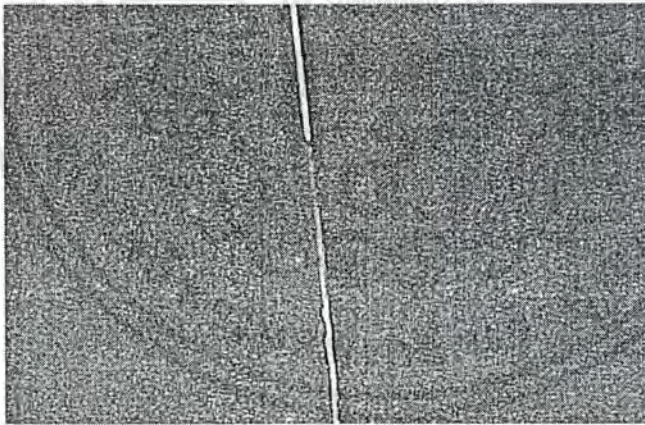
รูปที่ 6.3 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจากใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.4 ทำการเชื่อมต่อแก้วนำแสงยาว 1.5 กิโลเมตรที่แสดงในรูปที่ 6.4 กับอุปกรณ์คู่ควบ (coupler) และรูปที่ 6.5 แสดงรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์คู่ควบ



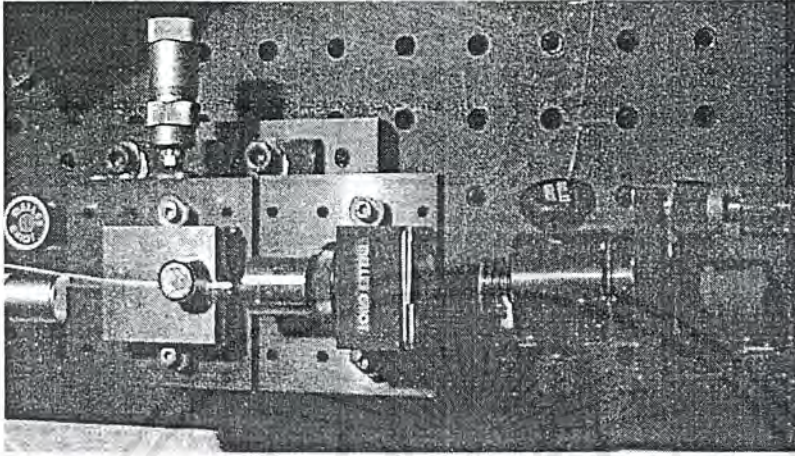
รูปที่ 6.4 ใยแก้วนำแสงระยะทางประมาณ 1.5 กิโลเมตร



รูปที่ 6.5 ภาพรอยต่อระหว่างใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์คู่ควบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.5 ทำการปรับค่าออฟเซตของตัวตรวจจับสัญญาณแสงแล้วทำการยิงสัญญาณ (launch) จากเลเซอร์แสงสีแดงที่ยังไม่ได้มอดูเลตสัญญาณข้อมูล เข้าใยแก้วนำแสงให้ได้มากที่สุดดังรูปที่ 6.6 โดยสังเกตจากสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับสัญญาณแสง

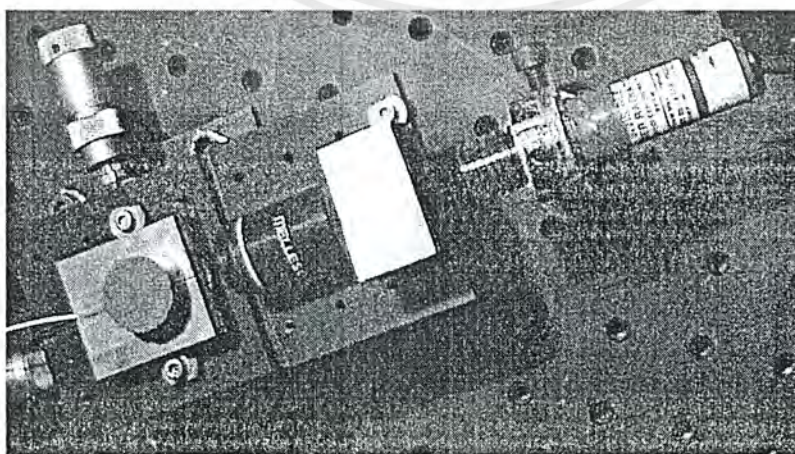


รูปที่ 6.6 แสดงการยิงสัญญาณจากเลเซอร์แสงสีแดงเข้าใยแก้วนำแสง

6.1.6 ทำการมอดูเลตสัญญาณความถี่ 10 kHz ที่มี  $V_{p-p}$  5.20 V เข้ากับเลเซอร์แสงสีแดงแล้วทำการวัดค่า  $V_{p-p}$  ที่ตัวตรวจจับสัญญาณแสงรับได้ จากนั้นให้ทำการเพิ่มความถี่ของสัญญาณทีละ 10 kHz จนถึง 190 kHz โดยที่ให้แรงดันมีค่าคงที่ สังเกตวัดค่า  $V_{p-p}$  ที่ตรวจจับสัญญาณแสงรับได้

6.1.7 ทำการมอดูเลตสัญญาณความถี่ 12.5 kHz เข้ากับเลเซอร์แสงสีแดงแล้วปิดแสงไว้ก่อน

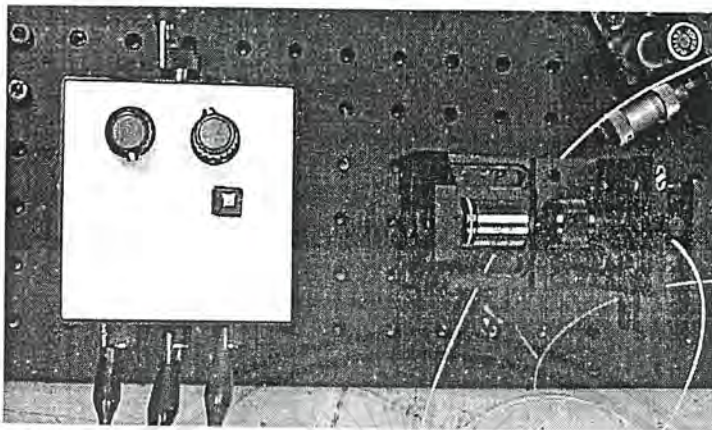
6.1.8 ทำการยิงสัญญาณจากเลเซอร์อินฟราเรดที่ยังไม่ได้มอดูเลตสัญญาณจากตัวต้นเฉพาที่เข้าใยแก้วนำแสงดังรูปที่ 6.7 ให้มีกำลังเท่ากับสัญญาณจากเลเซอร์แสงสีแดง โดยสังเกตเหมือนกับข้อ 6.1.5 แล้วปิดเลเซอร์อินฟราเรดไว้ก่อน



รูปที่ 6.7 แสดงการยิงสัญญาณจาก เลเซอร์อินฟราเรดเข้าใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรับการปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.9 ทำการมอดูเลตสัญญาณความถี่ 10 kHz เข้ากับเลเซอร์แสงอินฟราเรด จากนั้นก็เปิดเลเซอร์ทั้ง 2 อัน ยังเข้าใยแก้วนำแสงพร้อมกัน สังเกตการรวมสัญญาณที่ตัวตรวจจับแสงตรวจจับได้



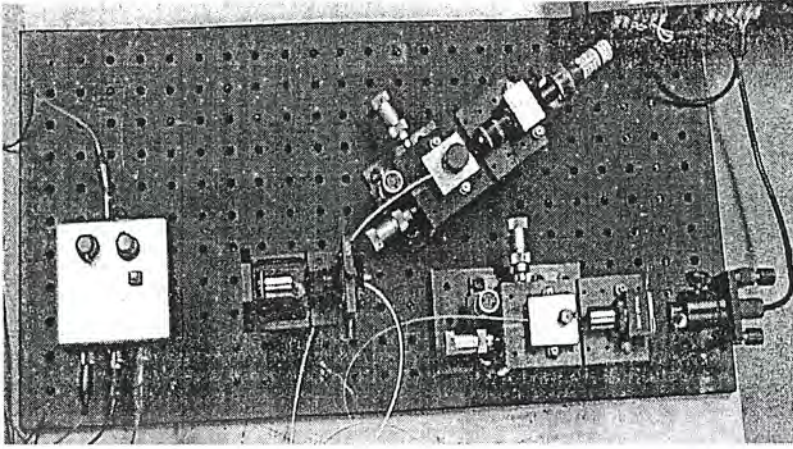
รูปที่ 6.8 แสดงการตรวจจับสัญญาณแสงจากใยแก้วนำแสง

## 6.2 การทดลองของสัญญาณที่มีการมัลติเพลกซ์

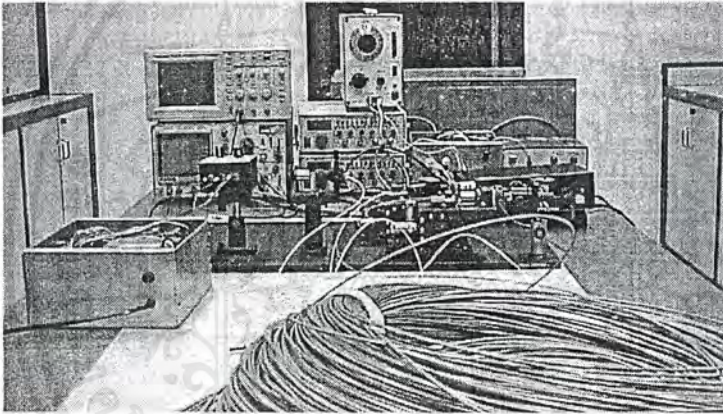
6.2.1 ทำการทดสอบสัญญาณที่ผ่านเข้าใยแก้วนำแสงโดยมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้าเลเซอร์แสงสีแดง โดยสัญญาณข้อมูลนี้เป็นสัญญาณที่ได้จากการมัลติเพลกซ์ และจากนั้นมอดูเลตสัญญาณเข้ากับตัวส่งเฉพาะที่ (เลเซอร์อินฟราเรด) ซึ่งสัญญาณที่มอดูเลตเข้ากับตัวส่งเฉพาะที่จะเป็นสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับสัญญาณช่องที่ 1 ของการมัลติเพลกซ์ โดยจะทำการยิงเข้าเส้นใยแก้วนำแสงที่ละสัญญาณ และสังเกตลักษณะของสัญญาณที่ตัวตรวจจับสัญญาณแสง ดังรูปที่ 6.8

6.2.2 เปิดสัญญาณจากเลเซอร์ทั้ง 2 ลำ ยังเข้าใยแก้วนำแสงพร้อมกัน เพื่อเป็นการศึกษาถึงวิธีการของระบบออปติก ที่จะเป็นนำสัญญาณจากการส่งเฉพาะที่รวมสัญญาณข้อมูลที่ส่งมา ซึ่งสังเกตการรวมกันของสัญญาณได้จากเอาต์พุตที่ได้

6.2.3 สังเกตและวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการรวมกันของสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณการส่งเฉพาะที่ สรุปผล และวิจารณ์



รูปที่ 6.9 การจัดอุปกรณ์ทั้งภาครับและภาคส่ง



รูปที่ 6.10 แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการสื่อสาร โดยเทคนิคออปติก

ในรูปที่ 6.9 และ 6.10 จะแสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง โดยเทคนิคออปติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2 โดยในตอนที่ 2 จะแบ่งลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการทดลองออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. สัญญาณทางไฟฟ้า เป็นลักษณะของสัญญาณก่อนที่จะส่งเข้าไปยังเส้นใยแก้วนำแสง
2. สัญญาณเอาต์พุต เป็นลักษณะของสัญญาณหลังจากผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง โดยจะถูกตรวจจับด้วยตัวตรวจจับแสง

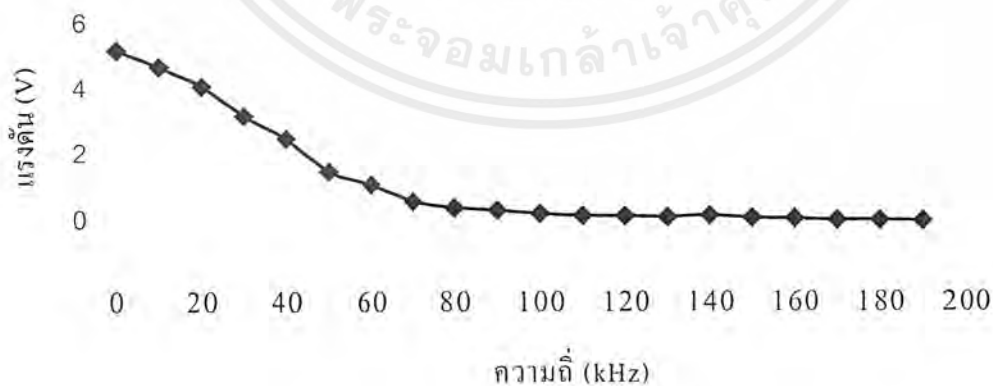
#### 7.1 ผลการทดลองตอนที่ 1

ตารางที่ 7.1 แสดงผลการทดลองค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆที่ตัวตรวจจับแสงตรวจจับได้

ความถี่ (Hz)	0	10k	20k	30k	40k	50k	60k	70k	80k	90k
แรงดัน (V)	5.2	4.72	4.16	3.28	2.56	1.56	1.12	0.6	0.4	0.33

ความถี่ (Hz)	100k	110k	120k	130k	140k	150k	160k	170k	180k	190k
แรงดัน (V)	0.23	0.18	0.16	0.13	0.12	0.1	0.09	0.04	0.03	0.02

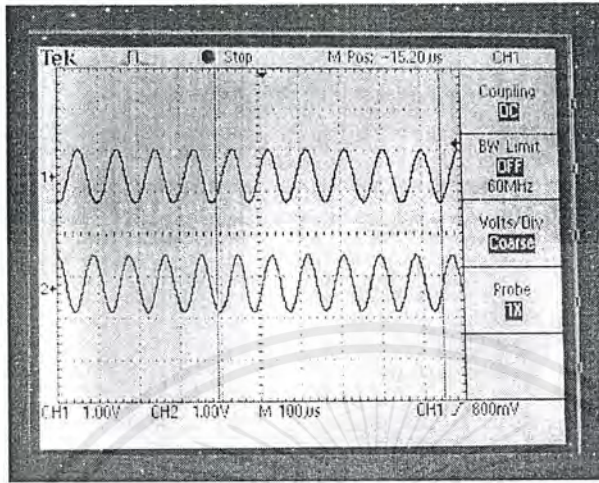
กราฟรูปที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ตามตารางที่ 7.1



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ

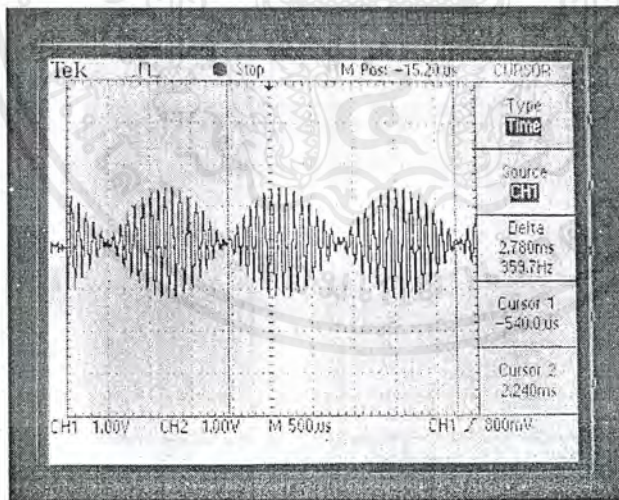
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณความถี่ 10 kHz กับ 12 kHz ที่จะมอดูเลตเข้ากับเลเซอร์แสงสีแดงและเลเซอร์อินฟราเรด แสดงได้ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 สัญญาณความถี่ 10 kHz กับ 12 kHz ที่จะมอดูเลตเข้ากับเลเซอร์แสงสีแดงและเลเซอร์อินฟราเรด

รูปของการรวมสัญญาณความถี่ 10 kHz กับ 12 kHz แสดงได้ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 การรวมกันของสัญญาณความถี่ 10 kHz กับ 12 kHz

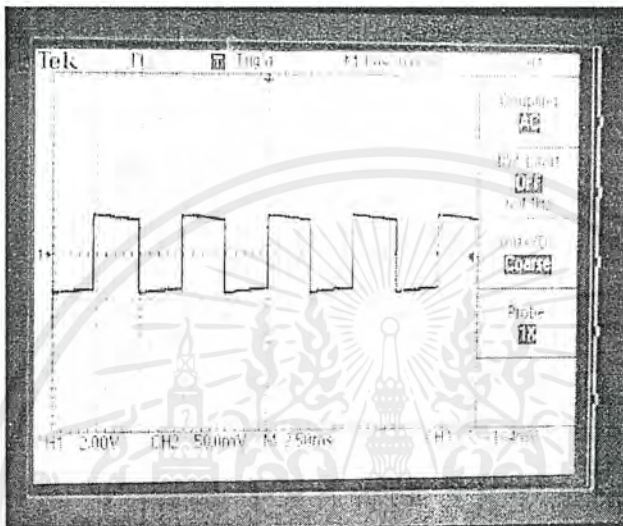
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

### 7.2.1 สัญญาณทางไฟฟ้า

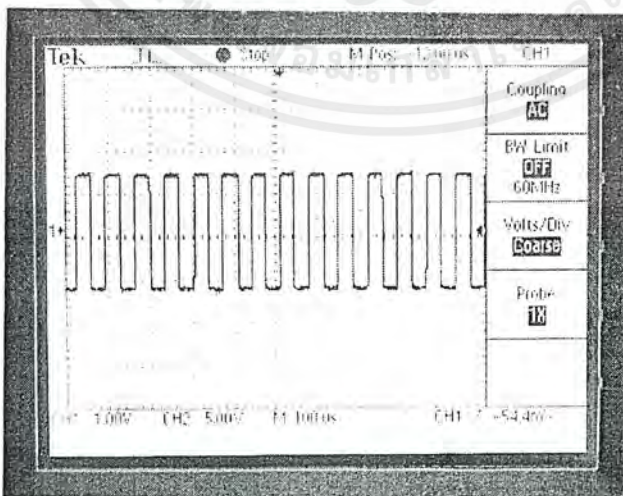
หัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลองทางไฟฟ้าของสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

สัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 200 Hz ดังรูปที่ 7.4 มีแรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ และคาบเวลา 5 มิลลิวินาที ใช้ในการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา



รูปที่ 7.4 สัญญาณนาฬิกาสำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

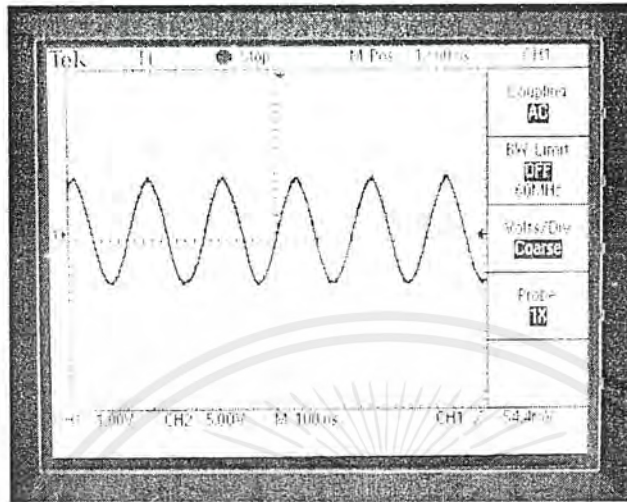
สัญญาณอินพุตรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 15.6 kHz ดังรูปที่ 7.5 มีแรงดันไฟฟ้า 2.6 โวลต์ และคาบเวลา 60 มิลลิวินาที ใช้เป็นสัญญาณในช่องสัญญาณที่ 1



รูปที่ 7.5 สัญญาณอินพุตช่องที่ 1 ก่อนทำการมัลติเพล็กซ์

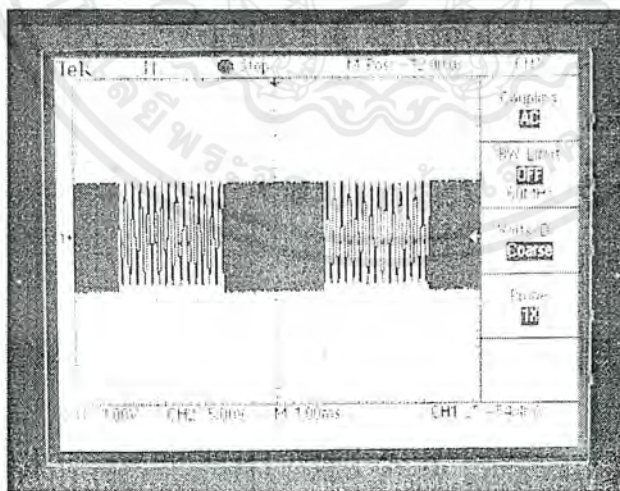
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอินพุตรูปไซน์ที่มีความถี่ 5.5 kHz ค้างรูปที่ 7.6 มีแรงดันไฟฟ้า 2.5 โวลต์ และคาบเวลา 180 มิลลิวินาที ใช้เป็นสัญญาณในช่องสัญญาณที่ 2



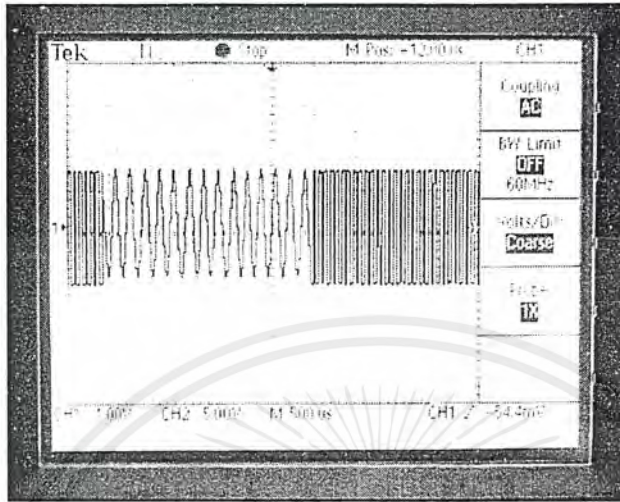
รูปที่ 7.6 สัญญาณอินพุตก่อนมัลติเพลกซ์ช่องที่ 2

สัญญาณมัลติเพลกซ์ที่ได้จากช่องสัญญาณอินพุตทั้ง 2 ช่องที่มีสัญญาณนาฬิกาความถี่ 200 Hz จะแสดงได้ดังรูปที่ 7.7 และ รูปที่ 7.8 เป็นการขยายสัญญาณในรูปที่ 7.7 ให้มีความชัดเจน ส่วนในรูปที่ 7.9 แสดงช่วงรอยต่อระหว่างสัญญาณอินพุตทั้ง 2 ช่องสัญญาณ

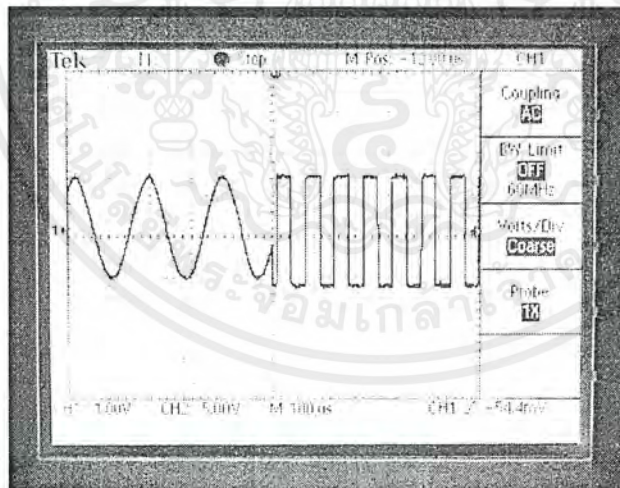


รูปที่ 7.7 สัญญาณมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.8 ภาพขยายสัญญาณมัลติเพิลกซ์



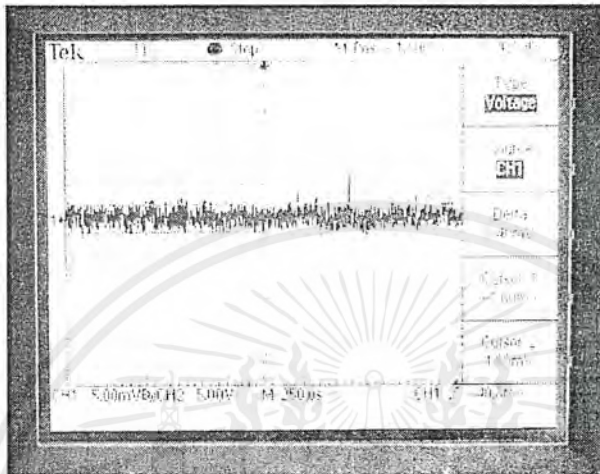
รูปที่ 7.9 ภาพขยายของรูปที่ 7.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.2.2 สัญญาณเอาต์พุต

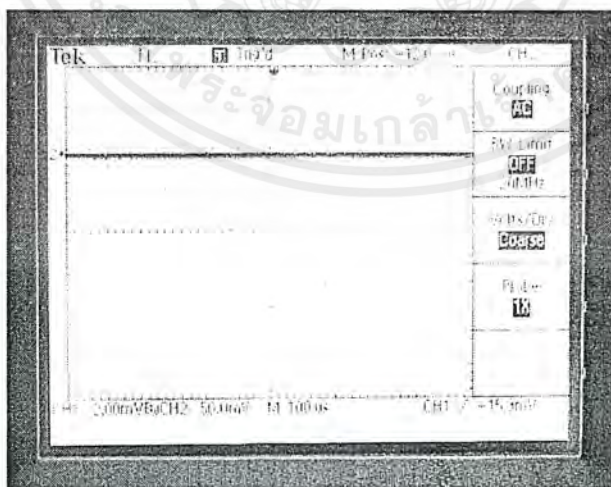
หัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลองของสัญญาณที่เกิดจากแสงที่ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

สัญญาณรบกวนหลังจากทำการปรับออฟเซต (offset) จะแสดงดังรูปที่ 7.10 ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.4 มิลลิโวลต์



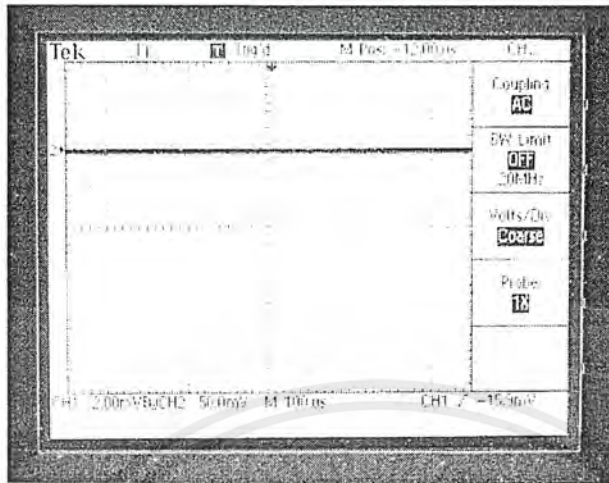
รูปที่ 7.10 ภาพสัญญาณรบกวนที่วัดได้จากตัวตรวจจับสัญญาณแสง

สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงก่อนการมอดูเลตสัญญาณข้อมูลเข้าเลเซอร์แสงสีแดงและเลเซอร์อินฟราเรดจะแสดงได้ในรูปที่ 7.11 และ 7.12 ตามลำดับ



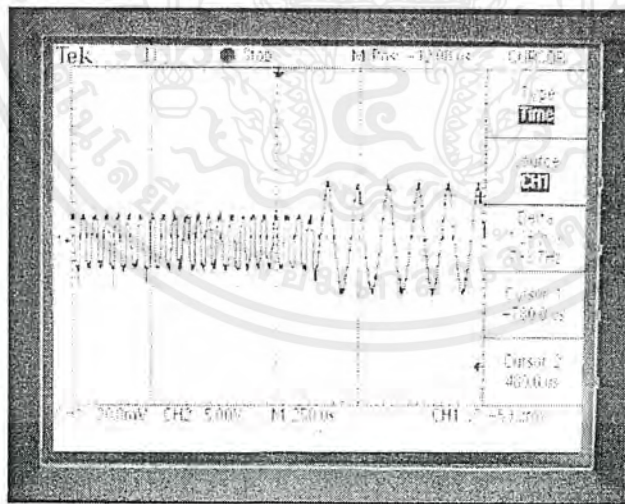
รูปที่ 7.11 สัญญาณกระแสตรงที่ตรวจจบบจากเลเซอร์แสงสีแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



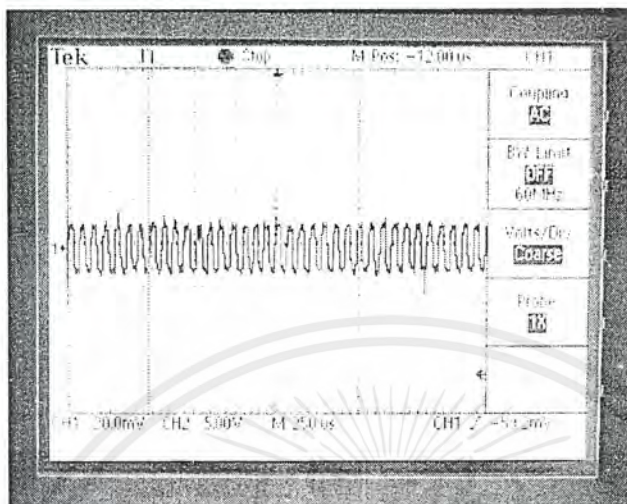
รูปที่ 7.12 สัญญาณกระแสตรงที่ตรวจจับจากเลเซอร์อินฟราเรด

เมื่อทำการมอดูเลตสัญญาณมัลติเพลกซ์เข้าเลเซอร์แสงสีแดงจะได้สัญญาณดังรูปที่ 7.13 โดยในรูปที่ 7.14 เป็นการขยายสัญญาณในส่วนของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากรูปที่ 7.13 และรูปที่ 7.15 เป็นการขยายสัญญาณในส่วนของสัญญาณรูปไซน์จากรูปที่ 7.13

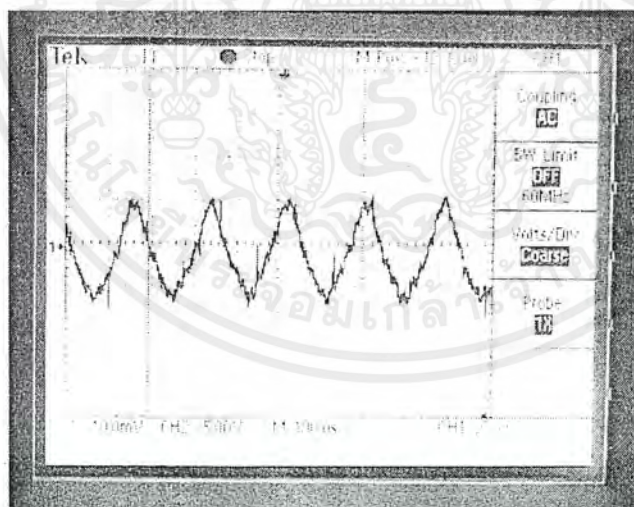


รูปที่ 7.13 สัญญาณมัลติเพลกซ์ที่ได้จากเลเซอร์แสงสีแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



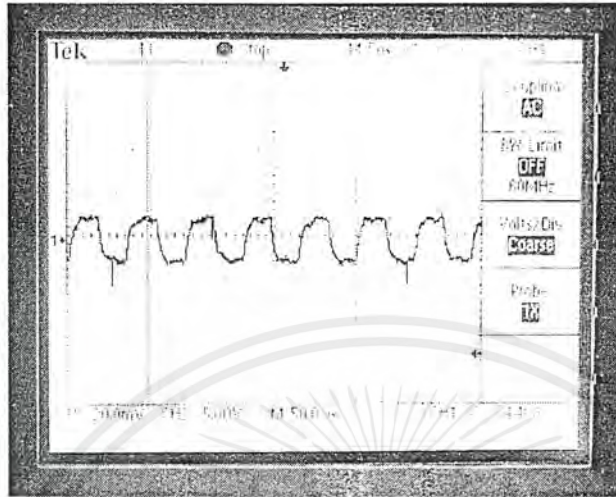
รูปที่ 7.14 ภาพขยายสัญญาณมัลติเพล็กซ์ในส่วนของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 7.15 ภาพขยายสัญญาณมัลติเพล็กซ์ในส่วนของสัญญาณรูปไซน์

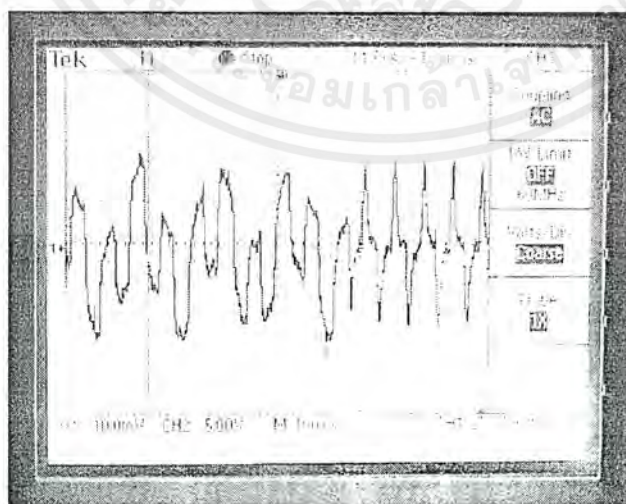
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ทำการมอดูเลตเข้าเลเซอร์อินฟราเรดและถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ  
สัญญาณทางแสงซึ่งแสดงดังรูปที่ 7.16



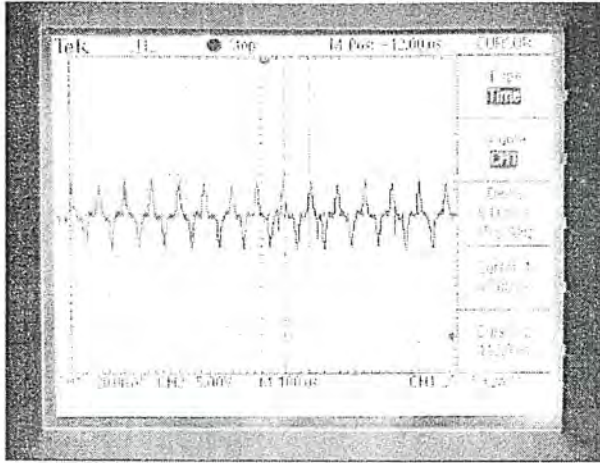
รูปที่ 7.16 สัญญาณจากตัวส่งเฉพาะที่ (ได้จากเลเซอร์อินฟราเรด)

สัญญาณที่ได้จากการรวมกันระหว่างสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณจากตัวส่งเฉพาะที่ จะเห็นว่าที่ความถี่สูง (สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม) จะถูกหักล้างโดยสัญญาณจากตัวส่งเฉพาะที่เนื่องจากมีความถี่ตรงกัน แต่มีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  ส่วนที่ความถี่ต่ำ (สัญญาณรูปไซน์) ดังแสดงในรูปที่ 7.17 ส่วนในรูปที่ 7.18 เป็นรูปขยายบริเวณที่เกิดการหักล้างของสัญญาณ และในรูปที่ 7.19 เป็นภาพสัญญาณรวมของสัญญาณในรูป 7.17

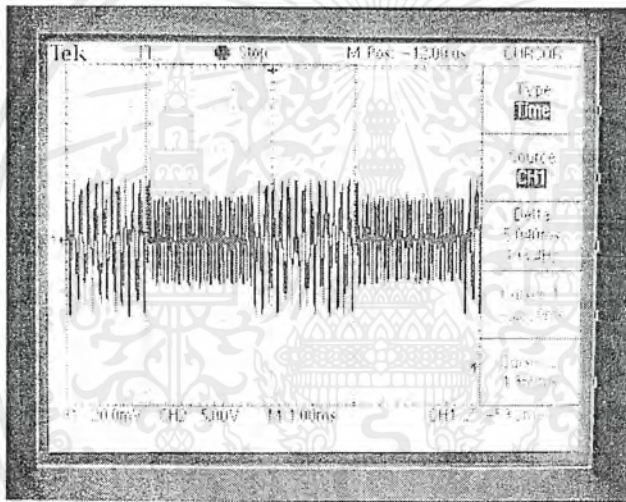


รูปที่ 7.17 สัญญาณรวมระหว่างสัญญาณมอดูเลตกับตัวส่งเฉพาะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.18 แสดงการขยายสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ถูกรบกวนแล้ว



รูปที่ 7.19 แสดงภาพรวมของสัญญาณในรูปที่ 7.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### สรุปผลการทดลองและแนวทางพัฒนา

#### 8.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในการทดลองเบื้องต้นจะทำให้สามารถทราบค่าแบนด์วิธของตัวตรวจจับแสงที่ใช้ในการทดลองได้ ซึ่งจะพบว่ามีค่า 20 kHz และทำให้ทราบถึงลักษณะการรวมกันของสัญญาณข้อมูลที่ยังไม่ได้ทำการมัลติเพล็กซ์กับสัญญาณการสั่นเฉพาะที่
2. ในการทดลองตอนที่ 2 สามารถหาค่าคลื่นพาห้ความถี่สูงจากสัญญาณข้อมูลได้ โดยการรวมสัญญาณข้อมูลเข้ากับสัญญาณของการสั่นเฉพาะที่ซึ่งสัญญาณการสั่นเฉพาะที่นี้จะกำหนดให้มีความถี่เท่าความถี่ของสัญญาณข้อมูลบิตหนึ่งแต่จะกลับเฟส  $180^\circ$  เพื่อความชัดเจนในการสังเกตสัญญาณหลังจากที่รวมกันแล้ว และจะพบว่าสัญญาณข้อมูลบิตหนึ่งจะหักล้างหมดเป็นเส้นตรง ส่วนอีกบิตหนึ่งจะรวมกันเป็นลักษณะของบิต ซึ่งทำให้สามารถแบ่งแยกข้อมูลที่เป็นบิตศูนย์และบิตหนึ่งได้
3. สัญญาณที่ทำการรวมกันแล้วจะเห็นว่าหักล้างไปได้ไม่หมด เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ของเฟสสัญญาณความถี่สูงที่เกิดจากสัญญาณที่ใช้มาจากแหล่งกำเนิดความถี่มีเฟสที่ไม่ตรงกันทั้งหมด จึงทำให้สัญญาณหักล้างกันไม่หมด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปัญหาในการสื่อสารระบบออปติคัลที่เจอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ โฮโมคายน์ที่ต้องการสัญญาณที่ได้จากการรวมกันของเลเซอร์ทั้งสองออกมาเป็นสัญญาณพื้นฐาน ทำให้ต้องมีการล็อกเฟสเพื่อให้เกิดการรวมกันอย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับในกรณีของระบบเฮเทอโรคายน์สัญญาณที่ได้จากการรวมนี้จะออกมาในรูปของสัญญาณที่เป็นสัญญาณ ไอเอฟซึ่งถ้าเฟสของการสั่นเฉพาะที่มีค่าไม่คงที่จะทำให้ค่าสัญญาณ ไอเอฟที่ได้มีลักษณะไม่คงที่ยากต่อการดีมอดูเลตออกมาเป็นสัญญาณพื้นฐาน
4. โดยรวมแล้วการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบออปติคัล จะช่วยเพิ่มแบนด์วิธในการส่งข้อมูลได้มากยิ่งขึ้นเนื่องจากสัญญาณข้อมูลก่อนที่จะส่งสามารถมีช่วงความถี่ที่กว้างโดยไม่ต้องคำนึงตัวรับว่าจะมีความสามารถในการรับได้ช่วงความถี่ได้กว้างเท่าใดเพราะว่าในการรับสัญญาณนั้นจะมีสัญญาณจากการสั่นเฉพาะที่เข้ามารวมเพื่อหักล้างหรือเพื่อความเข้าใจคือมาลดความถี่ของสัญญาณข้อมูลลงจนอยู่ในช่วงที่ตัวรับสามารถรับสัญญาณได้ อีกทั้งยังเพิ่มกำลังของสัญญาณข้อมูลที่เข้ามาให้มากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.2 แนวทางพัฒนาการทดลอง

1. จากการทดลองจะพบว่ามีปัญหาในเรื่องของเฟสที่เหลื่อมกันของการรวมสัญญาณ ทำให้ในการพัฒนาการทดลองต่อไปในอนาคตควรต้องมีวงจรในการล็อกเฟสเพื่อให้เฟสของสัญญาณมีลักษณะคงที่
2. ในการทดลองเกี่ยวกับแสงผู้ปฏิบัติการต้องเป็นผู้ที่มีความชำนาญในการทำการทดลองพอสมควร เพื่อให้สัญญาณแสงที่ได้มีความชัดเจนและสามารถส่งไปได้ในระยะไกล ซึ่งในการทดลองนี้ผู้ทำการทดลองยังไม่มี ความชำนาญมากในตอนเริ่มทดลอง จึงทำให้สามารถทำการทดลองได้ไกลเพียงแค่ 1.5 กิโลเมตรเท่านั้น ในการพัฒนาต่อไปควร จะส่งได้เป็นระยะทางที่ไกลกว่านี้เพื่อที่จะสามารถสังเกตข้อได้เปรียบของระบบการ สื่อสารแบบออปติคัลที่มีมากกว่าระบบการสื่อสารโดยตรง
3. การทดลองนี้จะสังเกตการรวมกันของแสงทั้งสองลำเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการสื่อสาร แบบออปติคัลจะสามารถที่จะเพิ่มแบนด์วิธในการส่งได้ด้วยการนำเอาสัญญาณจากการ สันเฉพาที่เข้ามาพร้อมกับสัญญาณข้อมูลก่อนที่จะส่งไปยังตัวตรวจจับแสง ซึ่งจะ สังเกตลักษณะของสัญญาณว่าหลังจากการรวมกันแล้วสัญญาณจะมีความแตกต่างกัน ระหว่างบิตศูนย์และบิตหนึ่ง โดยจะยังไม่ได้ทำการคิมอดูเลตสัญญาณที่ได้จากการรวม ออกมาเป็นลักษณะของสัญญาณพื้นฐาน ในการพัฒนาต่อไปควรทำการคิมอดูเลต สัญญาณออกมาเป็นสัญญาณพื้นฐานเพื่อจะได้ทราบถึงปัญหาต่างๆในการสื่อสารแบบ ออปติคัลต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

1. Sadakuni Shimada PhD, Coherent lightwave communications technology, Chapman & Hall, London 1995, 258p.
2. J.Gower, Optical communication systems, Prentice Hall, UK, 2<sup>nd</sup> ed. 1993.
3. Shiro Ryu, Coherent lightwave communication systems, Artech House, Boston, 1995, 283p.
4. Milorad Cvejetic, Coherent and nonlinear lightwave communication, Artech House. Boston, 1996, 304p.
5. ปรีชา ยูพาพิน. “เครือข่ายใยแก้วนำแสง” .สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2541
6. สุวรรณ คูสำราญ, “ทัศนศาสตร์กายภาพ” . ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้