

เซนเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโคร
โดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรป้อนกลับ

A MICRO-OPTICAL GYRO SENSOR
USING PANDA RING RESONATOR AND FEEDBACK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-D-018-211

เซนเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโคร
โดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรถูกย้อนกลับ

A MICRO-OPTICAL GYRO SENSOR
USING PANDA RING RESONATOR AND FEEDBACK



ชัยวัฒน์ ศิระวัฒนานนท์

CHAIWAT SIRAWATTANANON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-D-018-211

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MICRO-OPTICAL GYRO SENSOR
USING PANDA RING RESONATOR AND FEEDBACK

CHAIWAT SIRAWATTANANON



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-D-018-211

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016


FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เซ็นเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช่วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรถ่วงกลับ
Thesis Title A Mirco-Optical Gyro Sensor using PANDA Ring Resonator and Feedback
นักศึกษา นายชัยวัฒน์ ศิระวัฒนานนท์
รหัสประจำตัว 54610149
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-211

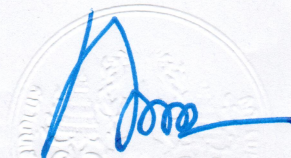
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	
ดร.อำนาจ	ชวเน	
ดร.ปกรณ์	วิวัฒนจตุรพร	
ดร.ชมพูนุท	จินจาคาม	ชมพูนุท จินจาคาม
รศ.ดร.สมศักดิ์	มิตะถา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY, LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมตัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เซนเซอร์โรโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า และวงจรถ่วงกลับ
นักศึกษา	นายชัยวัฒน์ ศิระพัฒนานนท์
รหัสประจำตัว	54610149
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเซนเซอร์โรโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรถ่วงกลับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลสัญญาณทางแสง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเทคโนโลยีเซนเซอร์เชิงแสงได้

นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของโรโรสโคป การวิเคราะห์สมการการส่งผ่านทางแสงในวงแหวนสั่นพ้องโดยคณิตศาสตร์ ซึ่งอธิบายได้ง่ายด้วยแผนภาพ SFG จากนั้นจึงนำเสนอเซนเซอร์โรโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า ซึ่งจำลองการทำงานพร้อมกับแสดงผลการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม 3D FDTD Solution การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์อันเกิดจากวงแหวนที่มีรัศมีและความยาวคลื่นที่แตกต่างกันนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัดของเซนเซอร์ แสงสองลำที่เดินทางต่างทิศกันในท่อนำแสงจากปรากฏการณ์ของแซ็กแน็คทำให้สามารถวัดการหมุนที่เกิดขึ้นได้แบบสามมิติ และชดเชยสัญญาณเฟสที่วัดได้โดยใช้ตัวควบคุมป้อนกลับ ออกแบบโรโรสโคปด้วยเทคโนโลยี silicon on insulator (SOI) ที่ตรงกับกระบวนการผลิต เอาต์พุตจากโรโรสโคปแพนด้าวัดค่าความไวของการหมุนได้สูงถึง 0.0036 องศาต่อชั่วโมง และทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	A Micro-Optical Gyro Sensor Using PANDA Ring Resonator and Feedback
Student	Mr.Chaiwat Sirawattananon
Student ID.	54610149
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somsak Mitatha

ABSTRACT

This thesis presents a micro-optical gyro sensor using PANDA ring resonators and feedback control to increase a resolution of the optical signal processing which can be applied to other optical sensor technologies.

We introduce a gyroscope background and analyze a mathematical model of a ring resonator to determine optical filter transfer function, which is represented in single flow graph (SFG) diagram. We propose a micro-optical gyro sensor using PANDA ring resonators. The simulation results are obtained using MATLAB program and the 3D FDTD Solution software. The analysis of resonant frequency in difference of ring radii and wavelength bands have the potential to offer high performance sensing. The two beams propagate in opposite directions within optical cavity based on Sagnac effect, which are measured in three-dimensional rotation motions. A feedback control is used to calibrate the output phase shift is archived. We design a gyroscope system based on silicon on insulator (SOI) substrate, which is compatible with conventional fabrication processes. The output result from gyroscope PANDA is shown high rotation sensitivity of 0.0036 degrees per hour and performance considerations of these systems are provided.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาคือ รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะธา และ รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน ที่ร่วมกันแนะนำงานวิจัยทางแสงซึ่งเป็นสาขาวิจัยที่น่าสนใจ อีกทั้งมีเครื่องมือและโปรแกรมจำลองคุณลักษณะทางแสงให้ศึกษาจึงเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยนี้ ตลอดจนให้คำชี้แนะ ช่วยเหลือ กระตุ้นเตือน ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องทุกคนในห้องวิจัย HCRL ที่สนับสนุน ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแลกเปลี่ยนความรู้รวมถึงประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อข้าพเจ้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับการศึกษาวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope Sensor).....	4
2.2 ทฤษฎีกราฟการไหลสัญญาณ (Signal Flow Graph Theory).....	9
2.3 หลักการของเวอร์เนียร์ (Vernier Operation).....	13
2.4 วงแหวนสั่นพ้องและฟิลเตอร์แอดดรอพ (Ring Resonator and Add/Drop Filter).....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.6 สรุปท้ายบท.....	25
บทที่ 3 เซนเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรถ่วงกลับ.....	26
3.1 คุณสมบัติของเซนเซอร์ไจโรเชิงแสง.....	27
3.2 การวิเคราะห์สมการการส่งผ่าน.....	28

3.3 ผลการทดลองจากสมการคณิตศาสตร์.....	34
3.4 ผลการทดลองจากโปรแกรม 3D FDTD	38
3.5 สรุปท้ายบท	59
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	60
4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ.....	60
4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	77
4.3 สรุปท้ายบท	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางพัฒนาในอนาคต.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	86



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของโจโรสโคปตามการใช้งาน.....	9
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB.....	35
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของคอมโพเนนท์ในโปรแกรม 3D FDTD	39
ตารางที่ 4.1 ย่านของความยาวคลื่น	72
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโจโรสโคปเชิงแสง	79
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของโจโรสโคปเชิงแสง (ต่อ).....	79



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ไจโรสโคป (Gyroscope).....	4
รูปที่ 2.2 ไจโรสโคป (MEMS Gyroscope).....	5
รูปที่ 2.3 ไจโรสโคปแบบวงแหวนเลเซอร์.....	5
รูปที่ 2.4 ไจโรสโคปชนิดใยแก้วนำแสง.....	6
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของสองลำแสงตามปรากฏการณ์แซ็กแน็ค.....	6
รูปที่ 2.6 เอาต์พุตไบอัส.....	8
รูปที่ 2.7 เอาต์พุตสเกลแพกเตอร์.....	9
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟการไหลสัญญาณ.....	10
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกฎการส่งผ่าน.....	11
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกฎการบวก.....	12
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างกฎการคูณ.....	12
รูปที่ 2.12 โพรงสั้นพ้องสองวงที่ต่อเรียงกันแบบอนุกรม.....	14
รูปที่ 2.13 กราฟเอาต์พุตที่ทรอปพอร์ตและธูพอร์ต.....	14
รูปที่ 2.14 โพรงสั้นพ้องเวอริเนียร์ลำดับที่สอง.....	15
รูปที่ 2.15 กราฟเอาต์พุตที่ทรอปพอร์ตและธูพอร์ตของโพรงสั้นพ้องเวอริเนียร์ลำดับที่สอง.....	15
รูปที่ 2.16 วงแหวนสั้นพ้อง (Ring Resonator).....	16
รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงวงแหวนสั้นพ้องแบบคัปปลิงเดี่ยว.....	17
รูปที่ 2.18 ผลการส่งผ่านของวงแหวนสั้นพ้องแบบคัปปลิงเดี่ยว.....	19
รูปที่ 2.19 ฟิลเตอร์แอดดรอป (Add/Drop Filter).....	19
รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงฟิลเตอร์แอดดรอป.....	20
รูปที่ 2.21 ผลการส่งผ่านของฟิลเตอร์แอดดรอป.....	22
รูปที่ 2.22 ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครแบบสั้นพ้องบนแผ่นซิลิกา.....	23
รูปที่ 2.23 ไจโรสโคปเชิงแสงโดยใช้ฟิลเตอร์แอดดรอป.....	23
รูปที่ 2.24 แอดดรอปฟิลเตอร์ขนาด 5 ไมโครเมตร.....	24

รูปที่ 2.25	กล้องโทรทรรศน์เชิงแสง CROW.....	24
รูปที่ 2.26	กล้องโทรทรรศน์เชิงแสง SCISSOR.....	24
รูปที่ 3.1	แผนผังของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	26
รูปที่ 3.2	เซนเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรถูกป้อนกลับ.....	27
รูปที่ 3.3	การหมุนของวัตถุ.....	28
รูปที่ 3.4	การหมุนแบบลำดับ Yaw-Pitch-Roll.....	28
รูปที่ 3.5	การสอบเทียบ (Calibration) ของกล้องโทรทรรศน์.....	30
รูปที่ 3.6	วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า.....	31
รูปที่ 3.7	สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ตามค่าของเฟส (ϕ) ระหว่าง 0° ถึง 180°	35
รูปที่ 3.8	สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้จากค่า κ ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9.....	36
รูปที่ 3.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM กับค่า κ ที่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9.....	36
รูปที่ 3.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q กับค่า κ ที่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9.....	37
รูปที่ 3.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sensitivity กับค่า κ ที่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9.....	37
รูปที่ 3.12	แถบสเปกตรัมและความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด.....	38
รูปที่ 3.13	โครงสร้างแบบสามมิติของกล้องโทรทรรศน์เชิงแสงโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า.....	42
รูปที่ 3.14	วงจรถูกป้อนกลับ (Feedback Control).....	43
รูปที่ 3.15	ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะสมดุล.....	44
รูปที่ 3.16	ค่านอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง.....	44
รูปที่ 3.17	แอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	45
รูปที่ 3.18	ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	45
รูปที่ 3.19	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	45
รูปที่ 3.20	แอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	46
รูปที่ 3.21	ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	46
รูปที่ 3.22	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง.....	46
รูปที่ 3.23	ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะหมุนรอบแกน X.....	47
รูปที่ 3.24	ค่านอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง.....	47
รูปที่ 3.25	แอมพลิจูดสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	48

รูปที่ 3.26	ควอนไทล์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	48
รูปที่ 3.27	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	48
รูปที่ 3.28	แฮมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	49
รูปที่ 3.29	ควอนไทล์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	49
รูปที่ 3.30	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง.....	49
รูปที่ 3.31	สัญญาณคลื่นแบบซึ้นบันได.....	50
รูปที่ 3.32	สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม.....	50
รูปที่ 3.33	ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะหมุนรอบแกน Z.....	51
รูปที่ 3.34	ค่าอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง.....	51
รูปที่ 3.35	แฮมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	52
รูปที่ 3.36	ควอนไทล์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	52
รูปที่ 3.37	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	52
รูปที่ 3.38	แฮมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	53
รูปที่ 3.39	ควอนไทล์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	53
รูปที่ 3.40	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง.....	53
รูปที่ 3.41	สัญญาณคลื่นแบบซึ้นบันได.....	54
รูปที่ 3.42	สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม.....	54
รูปที่ 3.43	ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะหมุนรอบแกน Y.....	55
รูปที่ 3.44	ค่าอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง.....	55
รูปที่ 3.45	แฮมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	56
รูปที่ 3.46	ควอนไทล์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	56
รูปที่ 3.47	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง.....	56
รูปที่ 3.48	แฮมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	57
รูปที่ 3.49	ควอนไทล์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง.....	57
รูปที่ 3.50	สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง.....	57
รูปที่ 3.51	สัญญาณคลื่นแบบซึ้นบันได.....	58
รูปที่ 3.52	สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม.....	58

รูปที่ 4.1 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 3 ไมโครเมตร.....	60
รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 7 ไมโครเมตร.....	61
รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 15 ไมโครเมตร.....	61
รูปที่ 4.4 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 21 ไมโครเมตร.....	61
รูปที่ 4.5 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร.....	62
รูปที่ 4.6 ค่า FSR ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร.....	62
รูปที่ 4.7 ค่า FWHM ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร.....	62
รูปที่ 4.8 ค่า Q ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร.....	63
รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร.....	63
รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 5.5 ไมโครเมตร.....	64
รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 7.5 ไมโครเมตร.....	64
รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 11.5 ไมโครเมตร.....	64
รูปที่ 4.13 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	65
รูปที่ 4.14 ค่า FSR ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	65
รูปที่ 4.15 ค่า FWHM ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	65
รูปที่ 4.16 ค่า Q ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	66
รูปที่ 4.17 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร.....	66
รูปที่ 4.18 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 5.5 ไมโครเมตร.....	67
รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 7.5 ไมโครเมตร.....	67
รูปที่ 4.20 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 11.5 ไมโครเมตร.....	67
รูปที่ 4.21 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	68
รูปที่ 4.22 ค่า FSR ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	68
รูปที่ 4.23 ค่า FWHM ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	68
รูปที่ 4.24 ค่า Q ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	69
รูปที่ 4.25 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร.....	69
รูปที่ 4.26 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 5.5 ไมโครเมตร.....	70
รูปที่ 4.27 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 7.5 ไมโครเมตร.....	70

รูปที่ 4.28 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 11.5 ไมโครเมตร.....	70
รูปที่ 4.29 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	71
รูปที่ 4.30 ค่า FSR ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	71
รูปที่ 4.31 ค่า FWHM ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	71
รูปที่ 4.32 ค่า Q ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร.....	72
รูปที่ 4.33 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน O	73
รูปที่ 4.34 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน E	73
รูปที่ 4.35 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน S	74
รูปที่ 4.36 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน C	74
รูปที่ 4.37 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน L	74
รูปที่ 4.38 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน U	75
รูปที่ 4.39 ค่า Sensitivity ตามย่านของความยาวคลื่น.....	75
รูปที่ 4.40 ค่า FSR ตามย่านของความยาวคลื่น.....	75
รูปที่ 4.41 ค่า FWHM ตามย่านของความยาวคลื่น.....	76
รูปที่ 4.42 ค่า Q ตามย่านของความยาวคลื่น.....	76
รูปที่ 4.43 โครงสร้างของเซนเซอร์โฟโตนิกส์แบบวงแหวน.....	77
รูปที่ 4.44 สัญญาณเอาต์พุตตามค่าเฟส (ϕ) ระหว่าง 0° ถึง 180°	77
รูปที่ 4.45 สัญญาณเอาต์พุตตามค่า κ ระหว่าง 0.1 ถึง 0.4.....	78
รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sensitivity กับค่า κ	78
รูปที่ 5.1 เซนเซอร์โฟโตนิกส์แบบโครงข่ายดาว.....	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ไจโรสโคปเชิงแสงแบบโพรงสั่นพ้องวงแหวนนิยมนำมาใช้ในการตรวจวัดหรือรักษาระดับการทรงตัวของวัตถุ เป็นเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับการเอียงหรือการหมุนเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ โดยสัญญาณที่วัดได้จากไจโรสโคปคือ อัตราการหมุนรอบแกนที่วัตถุนั้นเคลื่อนที่เทียบกับแกนอ้างอิงเริ่มต้น ณ เวลาใดหนึ่ง ไจโรสโคปเชิงแสงชนิดนี้ไม่อาศัยแรงกระทำจากภายนอกตามกฎทางฟิสิกส์ ทำให้แยกความแตกต่างระหว่างแกนอ้างอิงเฉื่อยและแกนอ้างอิงไม่เฉื่อยได้ในสภาวะการณ์การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ การหมุน และการเร่ง เป็นต้น

ระบบนำร่องและระบบนำทางจะใช้ไจโรสโคปที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือในการตรวจวัดเมื่อทราบตำแหน่งและทิศทางตั้งต้นของพาหนะก็สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ณ เวลาหนึ่งได้ ไจโรสโคปในระบบนำร่องต้องสามารถตรวจวัดการเคลื่อนที่ของพาหนะได้แบบ 3 มิติ คือในแนวแกน x แกน y และแกน z โดยจะต้องเป็นเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงและมีความเสถียรเป็นพิเศษ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทหรือลักษณะของงานที่นำไปใช้

ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครแบบสั่นพ้อง (Resonant Micro-Optic Gyro: RMOG) เป็นเซนเซอร์ที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก มีความแม่นยำสูง และนำไปใช้งานได้แพร่หลาย จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยการวัดความเร็วเชิงมุมของลำแสงสองลำที่ป้อนเข้าสู่วงแหวนสั่นพ้อง (Ring Resonator) ซึ่งสัญญาณที่วัดได้มีความต่างเฟสตามความถี่ที่กำหนด ดังนั้นวงแหวนสั่นพ้องดังกล่าวจึงเป็นอุปกรณ์หลักของไจโรประเภทนี้ โดยมีการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของเซนเซอร์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวงแหวนสั่นพ้องแพนด้า (PANDA Ring Resonator) ที่มีคุณสมบัติเป็นเซนเซอร์เพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณทางแสง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเทคโนโลยีเซนเซอร์เชิงแสงได้ โดยนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของวงแหวนสั่นพ้อง การวิเคราะห์สมการการส่งผ่านของแสงด้วยแผนภาพ (Signal Flow Graph) ออกแบบระบบเซนเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า และวงจรป้อนกลับ พร้อมทั้งจำลองการทำงานและแสดงผลการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม 3D FDTD Solution แสดงผลการวิเคราะห์ความถี่ที่กำหนดที่เกิดจากวงแหวนที่มีรัศมีและความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจวัดของเซนเซอร์ โดยลักษณะของสัญญาณจะมีความต่างเฟสที่เกิดขึ้นจากการหมุนหรือวัตถุ

เคลื่อนที่ตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค ทำให้สามารถตรวจวัดหรือสอบเทียบสัญญาณ (Calibration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้โดยใช้วงจรถ่วงกลับ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการตรวจวัดการหมุนหรือการเคลื่อนที่ในสามมิติ และออกแบบระบบด้วยเทคโนโลยี silicon on insulator (SOI) ซึ่งไอโรสโคปเชิงแสงขนาดไมโครนี้สามารถนำไปใช้ในระบبنำร่องหรือระบบนำทาง เพื่อตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุ เช่น ใน ยานพาหนะ ดาวเทียม และจรวด เป็นต้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบไอโรสโคปโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าขนาดไมโครเมตร
2. ไอโรสโคปที่ออกแบบสามารถตรวจวัดการหมุนได้แบบสามมิติ
3. ออกแบบวงจรถ่วงกลับเพื่อสอบเทียบสัญญาณ
4. ได้เซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบไอโรสโคปเชิงแสงและจำลองผลการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้ ออกแบบ โดยวิเคราะห์โครงสร้างด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และใช้โปรแกรมจำลองผลการทดลอง ที่สามารถพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎี และปรากฏการณ์ที่นำมาใช้ในการจำลอง การทำงานมีการเกิดขึ้นจริง เพื่อสนับสนุนกระบวนการทำงานในแบบจำลองและสามารถรับรอง ผลลัพธ์ให้เชื่อมั่นได้ว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นสามารถทำงานได้จริงในทางปฏิบัติ

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาคุณลักษณะและวิธีการทำงานของไอโรสโคป
2. ศึกษาทฤษฎีและปรากฏการณ์ทางแสงที่เกี่ยวข้องกับไอโรสโคป
3. วิเคราะห์โครงสร้างและการส่งผ่านของแสงด้วยสมการคณิตศาสตร์
4. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของไอโรสโคปและหาค่าที่เหมาะสม
5. จำลองผลการทดลองจากสมการคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
6. ออกแบบระบบแบบสามมิติและจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม FDTD Solution
7. สรุปผลการทดลองและเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. ได้เซนเซอร์โฟโตรีซิสติวเชิงแสงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
2. สามารถตรวจวัดได้แบบสามมิติและสอบเทียบสัญญาณได้
3. เป็นเซนเซอร์ขนาดไมโครเมตรที่สามารถสร้างขึ้นได้จริง
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบนำร่องหรือระบบนำทางที่ต้องการความละเอียดสูงได้
5. เพื่อส่งเสริมนวัตกรรมและพัฒนาองค์ความรู้ใหม่

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้จัดเรียงเนื้อหาเกี่ยวกับโฟโตรีซิสติวเชิงแสงและอุปกรณ์ทางแสงโดยโครงสร้างของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของการวิจัย โดยมุ่งเน้นในเรื่องของโฟโตรีซิสติวเชิงแสงที่เป็นหัวข้อวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อธิบายหลักการทำงานรวมถึงคุณลักษณะของโฟโตรีซิสติว อันเป็นความรู้ที่สามารถต่อยอดและนำไปใช้ในหัวข้อถัดไป

บทที่ 3 เซนเซอร์โฟโตรีซิสติวเชิงแสงขนาดไมโครเมตรโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรป้อนกลับ โดยเป็นงานวิจัยที่ได้ออกแบบและจำลองผลการทดลองตามที่กำหนด

บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อใช้อ้างอิงและเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางพัฒนาในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย คุณลักษณะและหลักการการทำงานของ ไจโรสโคป การตรวจวัดของไจโรสโคปเชิงแสง ทฤษฎีกราฟการไหลของสัญญาณ หลักการของเวอร์เนียร์ การวิเคราะห์วงแหวนสั่นพ้องและฟิลเตอร์แอดดรอป พร้อมกับนำเสนอตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยอธิบายในลำดับถัดไป

2.1 เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope Sensor)

เมื่อ ค.ศ. 1852 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ ฌอง โบนาปาด เลอง ฟูโกลต์ (Leon Foucault) ได้ประดิษฐ์และตั้งชื่อ ไจโรสโคป (gyroscope) ขึ้นเพื่อใช้เรียกสิ่งที่ติดตั้งในวงแหวนหมุนได้ คือชุดวงแหวนที่ยอมให้ล้อหมุนโดยอิสระในทิศทางใดๆ ซึ่งล้อที่หมุนอยู่นั้นยังคงทิศทางเดิมของมัน ในอากาศโดยไม่ขึ้นกับการเอียงไปมาของวงแหวนที่ล้อมรอบเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Rigidity in Space เมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้แกนของไจโรสโคปหันไปจากแนวเดิม เช่นหากกดที่แกนนอนมันจะหันรอบแกนตั้ง และหากใส่แรงที่แกนตั้งมันจะกระดกรอบแกนนอน เรียกว่าการควง (Precession) ดังรูปที่ 2.1



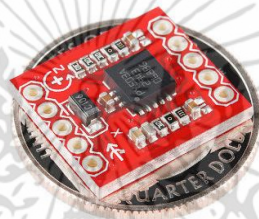
รูปที่ 2.1 ไจโรสโคป (Gyroscope)

ไจโรสโคปเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อหมุนเพื่อช่วยรักษาระดับทิศทางของแกนหมุน ประกอบด้วยล้อหมุนเร็วบรรจุอยู่ในกรอบอีกทีหนึ่ง ทำให้เอียงในทิศทางต่างๆ ได้โดยอิสระนั่นคือ หมุนในแกนใดๆก็ได้ โมเมนตัมเชิงมุมของล้อนั้นจะช่วยรักษาตำแหน่งเดิมไว้แม้กรอบล้อจะเอียง จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงาน เช่น เข็มทิศ ระบบนำร่องเครื่องบิน เรือ

ดาวเทียม จรวด รวมถึงหุ่นยนต์และยานอวกาศ เป็นต้น โดยไจโรสโคปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้โปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

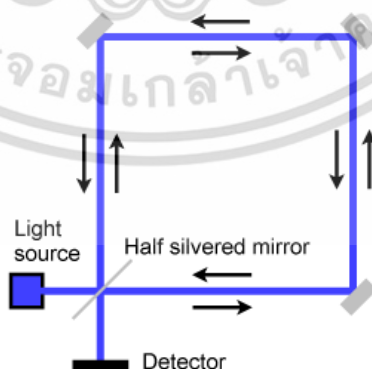
1) ไจโรสโคปแบบมีมวลหมุน (Spinning mass Gyroscope) เป็นไจโรยุคแรกที่ใช้จานหมุนหรือมวลหมุนอย่างต่อเนื่องเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.1

2) Vibrating Gyroscope ใช้เทคโนโลยี Micro-electro-mechanical system (MEMS) ทำให้ไจโรสโคปมีขนาดเล็กและใช้แพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีหลักการทำงานอยู่บนพื้นฐานการสั่นของระบบมวล (Mass) สปริง (Spring) และตัวหน่วง (Damper) ซึ่งมวลภายในจะสั่นที่ความถี่สั่นพ้อง (Resonance Frequency) เมื่อมีความเร็วเชิงมุมภายนอกกระทำต่อไจโรสโคปจะทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Coriolis Force) เป็นผลให้เกิดการสั่นในทิศทางตั้งฉากกับการสั่นเดิม ความเร็วเชิงมุมดังกล่าวสามารถหาค่าได้จากการวัดแอมพลิจูดการสั่นเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง ตัวอย่างเช่น MEMS Gyroscope เป็นไจโรสโคปที่วัดผลแบบดิจิทัลโดยมีอินเตอร์เฟสรองรับการเชื่อมต่อดังรูปที่ 2.2



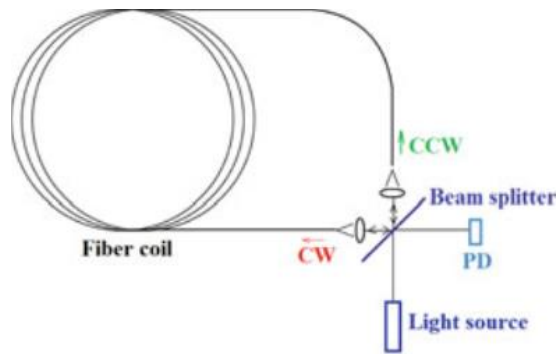
รูปที่ 2.2 ไจโรสโคป (MEMS Gyroscope)

3) Optical Gyroscope เป็นไจโรสโคปเชิงแสงที่ใช้ปรากฏการณ์แซ็กแน็ค (Sagnac Effect) ในการตรวจวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้เลเซอร์สองลำแสงเป็นตัวเปรียบเทียบค่าความต่างทางเวลาและเฟสของสัญญาณที่เกิดขึ้น เช่น ไจโรสโคปแบบวงแหวนเลเซอร์ (Ring Laser Gyroscope: RLG) ไจโรสโคปชนิดใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Gyroscope: FOG) ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



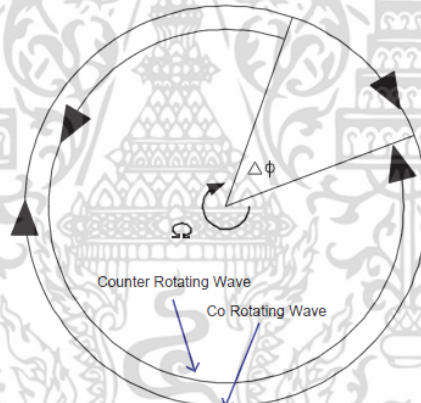
รูปที่ 2.3 ไจโรสโคปแบบวงแหวนเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ไจโรสโคปชนิดใยแก้วนำแสง

โดยหลักการทำงานนั้นจะป้อนลำแสงสองลำแสงเข้าสู่ระบบ ที่ตำแหน่งเริ่มต้นลำแสงหนึ่งจะหมุนในระบบตามเข็มนาฬิกาและอีกลำแสงหนึ่งจะหมุนในระบบทวนเข็มนาฬิกา เมื่อมีความเร็วเชิงมุม (Ω) เกิดขึ้น จะทำให้ระยะทางของลำแสงที่เดินทางตามเข็มนาฬิกาเพิ่มขึ้นเมื่อเดินทางกลับไปจุดเริ่มต้นรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของสองลำแสงตามปรากฏการณ์แซ็กแน็ค

เวลาที่ใช้ในการเดินทางของแสงทั้งสองลำสามารถคำนวณได้จาก

$$ct_1 = 2\pi R + \Omega R t_1$$

$$t_1 = \frac{2\pi R}{c - \Omega R}$$

$$ct_2 = 2\pi R - \Omega R t_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_2 = \frac{2\pi R}{c + \Omega R}$$

โดย t_1 คือ เวลาในการเดินทางของแสงตามเข็มนาฬิกา

t_2 คือ เวลาในการเดินทางของแสงทวนเข็มนาฬิกา

R คือ รัศมีของวงกลม

C คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ

ค่าความต่างของระยะทางที่แสงทั้งสองลำใช้ในการเดินทางหาได้จาก

$$\Delta L = ct_1 - ct_2 = 2\pi R \left(\frac{1}{1 - \frac{\Omega R}{c}} - \frac{1}{1 + \frac{\Omega R}{c}} \right) \approx \frac{4\pi R^2 \Omega}{c} \quad (2.1)$$

ลำแสงสองลำที่มีความเร็วเท่ากันแต่ใช้เวลาในการเดินทางต่างกันโดยลำแสงที่ทวนเข็มนาฬิกาจะใช้เวลาน้อยกว่าลำแสงตามเข็มนาฬิกาเท่ากับ

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c} = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c^2} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 สามารถคำนวณความต่างเฟสของแสงทั้งสองลำได้จาก

$$\Delta\phi = \Delta t \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{8\pi^2 R^2 \Omega}{c\lambda} = \frac{8\pi A\Omega}{c\lambda} \quad (2.3)$$

โดย A คือ พื้นที่ของเส้นทางวงกลมที่แสงใช้เดินทาง

λ คือ ความยาวคลื่น

ความต่างเฟสเชิงแฉกนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในหลายแกนของระบบปิด โดยกำหนดพื้นที่และความเร็วเชิงมุมเป็นเวกเตอร์ ดังนี้

$$\Delta\phi = \frac{4\omega}{c^2} \vec{A} \cdot \vec{\Omega} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 คุณสมบัติของไจโรสโคป

ไจโรสโคปแต่ละประเภทมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพที่ต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน นอกจากนี้เรื่องของขนาดและราคาของไจโรสโคปแล้วยังมีปัจจัยอื่นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมได้แก่ อุณหภูมิ อายุการใช้งาน จำนวนแกน ค่าไบอัส (Bias) ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเชิงมุม (Angle Random Walk) และค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) เป็นต้น

2.1.1.1 ไบอัส (Bias) คือ ค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเวลาที่กำหนดของเอาต์พุตไจโรที่ถูกวัดในสภาพการทำงานที่กำหนด ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับอินพุตการหมุนหรือความเร็ว มีหน่วยเป็นองศาต่อชั่วโมง (deg/h) หรือองศาต่อวินาที (deg/s) คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 และแสดงผลได้ดังรูปที่ 2.6

$$\theta(t) = \varepsilon \cdot t \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.6 เอาต์พุตไบอัส

2.1.1.2 ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเชิงมุม (Angle Random Walk: ARW) คือ ค่าความผิดพลาดเชิงมุมที่เกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณรบกวนขาว (White Noise) มีหน่วยเป็นองศาต่อรากที่สองของชั่วโมง (deg/ \sqrt{h}) หรือองศาต่อรากที่สองของวินาที (deg/ \sqrt{s}) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 – 2.8

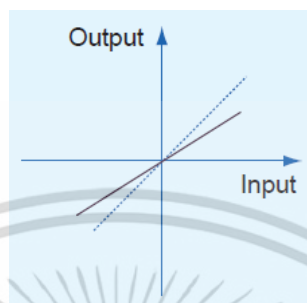
$$\sigma_{\theta}(t) = \sigma \cdot \sqrt{\delta t \cdot t} \quad (2.6)$$

$$ARW = \sigma_{\theta}(1) \quad (2.7)$$

$$ARW(^{\circ}/\sqrt{h}) = \frac{1}{60} \sqrt{PSD(^{\circ}/h)^2 / Hz} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 สเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของค่าเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงในอินพุตที่ประสงค์จะวัด ซึ่งสเกลแฟกเตอร์ทั่วไปจะวัดเป็นค่าสโลป (Slope) ของเส้นตรงซึ่งสามารถหาค่าได้โดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Method of Least Squares) ของข้อมูลอินพุต-เอาต์พุต (Input-Output) ที่ได้จากการวัดค่าอินพุตระดับต่างๆตลอดช่วงพิสัยของอินพุต



รูปที่ 2.7 เอาต์พุตสเกลแฟกเตอร์

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของไจโรสโคปตามการใช้งาน

Gyro Grade	Bias ($^{\circ}/h$)	ARW ($^{\circ}/\sqrt{h}$)	Scale Factor (ppm)
Rate grade	10 – 1000	> 0.5	1000 – 10000
Tactical grade	1 – 10	0.5 – 0.05	100 – 1000
Intermediate grade	0.01 – 1	0.05 – 0.005	10 – 100
Inertial grade	< 0.01	< 0.005	5
Strategic grade	< 0.001	< 0.0003	1

2.2 ทฤษฎีกราฟการไหลสัญญาณ (Signal Flow Graph Theory)

กราฟการไหลสัญญาณลักษณะคล้ายกับเครือข่ายที่ประกอบด้วยโหนดหลายโหนดเชื่อมต่อกัน โดยนำเสนอเป็นรูปภาพที่เข้าใจได้ง่าย ใช้ในการจำลองสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายทิศทางการไหลของสัญญาณในระบบ เป็นเทคนิคที่ใช้อย่างแพร่หลายในหลายด้านเช่น อิเล็กทรอนิกส์ การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และระบบควบคุม ซึ่งคิดค้นโดย Mason ในปีค.ศ. 1950 [1, 2]

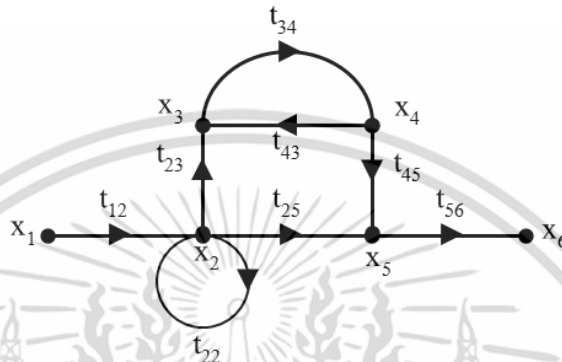
โดยทั่วไปเทคนิคกราฟการไหลสัญญาณจะใช้ในการแก้ปัญหาสมการพีชคณิตเชิงเส้น ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} x_i, \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (2.9)$$

โดย $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ คือ โหนดตัวที่ 1 ถึง n

และ t_{ij} คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างโหนดที่ติดกัน ดังตัวอย่างรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟการไหลสัญญาณ

2.2.1 คำนิยามต่างๆของกราฟการไหลสัญญาณ (SFG)

2.2.1.1 โหนด (Node) คือจุดในแผนภาพสัญญาณที่มีการพุ่งเข้าและ/หรือพุ่งออกของสัญญาณ

2.2.1.2 เส้นทางย่อย (Branch) คือเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งเชื่อมระหว่างโหนดสองโหนด โดยไม่ผ่านโหนดอื่นใดทั้งสิ้น กำหนดด้วยสัญลักษณ์หรือตัวเลขและลูกศร เช่น $x_1 \rightarrow x_2$ จะมีเส้นทางย่อยคือ t_{12}

2.2.1.3 อินพุตโหนด (Input Node) คือโหนดที่มีสัญญาณพุ่งออกแต่ไม่มีสัญญาณพุ่งเข้า เช่น โหนด x_1

2.2.1.4 เอาต์พุตโหนด (Output Node) คือโหนดที่มีสัญญาณพุ่งเข้าแต่ไม่มีสัญญาณพุ่งออก เช่น โหนด x_6

2.2.1.5 เส้นทางแบบป้อนกลับ (Feedback Path) คือเส้นทางปิดที่มีจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดเป็นโหนดเดียวกัน โดยสามารถวิ่งผ่านโหนดแต่ละโหนดได้เพียงครั้งเดียว เช่น $x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_3$

2.2.1.6 วงปิด (Loop) คือเส้นทางร่วมที่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดที่โหนดเดียวกัน โดยมีเพียงหนึ่งเส้นทางย่อย เช่น $x_2 \rightarrow x_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.7 วงปิดที่ไม่แตะ (Nontouching Loop) คือวงปิดตั้งแต่สองวงที่ไม่มีโหนดใดโหนดหนึ่งร่วมกัน เช่น $x_2 \rightarrow x_2$ และ $x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_3$

2.2.1.8 อัตราขยายของวงปิด (Loop Gain) คือผลคูณของฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำกับเส้นทางย่อยทั้งหมดที่ประกอบกันขึ้นเป็นวงปิด เช่น $t_{34}t_{43}$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงปิด $x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_3$

2.2.1.9 เส้นทางร่วมรุดหน้า (Forward Path) คือเส้นทางที่ได้จากการต่อเส้นทางย่อยที่มีทิศทางเดียวกันตั้งแต่สองเส้นทางย่อย เพื่อให้สัญญาณสามารถเดินทางระหว่างอินพุตโหนดและเอาต์พุตโหนด โดยเส้นทางร่วมนี้ไม่อาจวิ่งผ่านโหนดใดโหนดหนึ่งมากกว่าหนึ่งครั้ง เช่น $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_5 \rightarrow x_6$ และ $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5 \rightarrow x_6$

2.2.1.10 อัตราขยายของเส้นทางร่วม (Forward Path Gain) คือ ผลคูณของฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำกับเส้นทางย่อยทั้งหมดที่ประกอบกันขึ้นเป็นเส้นทางร่วม เช่น $t_{12}t_{25}t_{56}$ เป็นผลคูณของฟังก์ชันถ่ายโอนของเส้นทางร่วม $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_5 \rightarrow x_6$

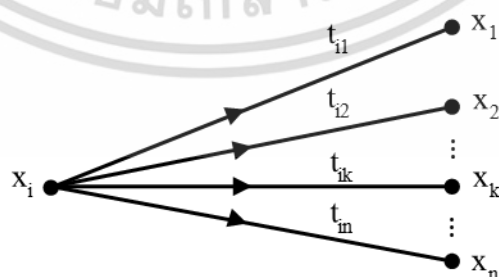
2.2.2 กฎของกราฟการไหลสัญญาณ (SFG)

กฎพื้นฐานที่ใช้ในทฤษฎีกราฟการไหลสัญญาณ ได้แก่ กฎการส่งผ่าน กฎการบวกและกฎการคูณ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.2.1 กฎการส่งผ่าน (Transmission Rule) การส่งผ่านจากโหนดหนึ่งไปยังโหนดใด ๆ จะใช้เส้นทางย่อยที่เชื่อมระหว่างโหนดตั้งต้นและโหนดสิ้นสุด สามารถกำหนดเป็นสมการการส่งผ่านได้ดังนี้

$$x_j = t_{ij} x_i, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

อธิบายได้ดังรูปที่ 2.9



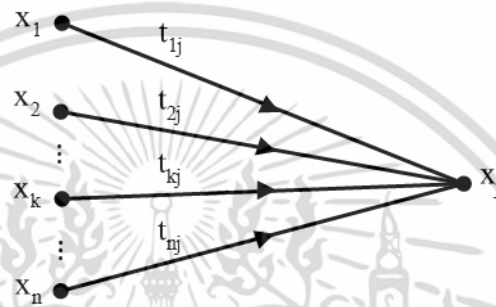
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกฎการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 กฎการบวก (Addition Rule) การส่งผ่านจากโหนดใดๆไปยังโหนดหนึ่งหนึ่ง สามารถคำนวณการส่งผ่านของทุกโหนดได้จากสมการ

$$x_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} x_i \quad (2.11)$$

อธิบายได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกฎการบวก

2.2.2.3 กฎการคูณ (Product Rule) การส่งผ่านจากโหนดตั้งต้นไปยังโหนดสุดท้ายจะ คำนวณการส่งผ่านในแต่ละเส้นทางย่อยได้เท่ากับการส่งผ่านตามจำนวนโหนดทั้งหมดตั้งสมการ

$$x_n = (t_{12} t_{23} \cdots t_{(n-1)n}) x_1 \quad (2.12)$$

อธิบายได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างกฎการคูณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 สูตรของเมสันสำหรับการหาฟังก์ชันถ่ายโอน

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างอินพุตโหนดและเอาต์พุตโหนดคู่ใด ๆ อธิบายได้ดังสมการ

$$H = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n T_i \Delta_i \quad (2.13)$$

$$\Delta = 1 - \sum_i L_i + \sum_{i,j} L_i L_j - \sum_{i,j,k} L_i L_j L_k + \dots \quad (2.14)$$

โดยที่ H คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างอินพุตโหนดและเอาต์พุตโหนด

T_i คือ อัตราขยายของเส้นทางร่วมรูดหน้าทีเชื่อมระหว่างอินพุตโหนดและเอาต์พุตโหนด

$\Delta = 1 -$ (ผลบวกของอัตราขยายของวงปิดทุกวง) + (ผลบวกของผลคูณของอัตราขยายของวงปิดทุกคู่ที่ไม่แตะกัน) - (ผลบวกของผลคูณของอัตราขยายของวงปิดทุกสามวงที่ไม่แตะกัน) + ...

Δ_i คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการสมมติใน Δ ว่าวงปิดทุกวงที่แตะกับ T_i มีค่าเป็นศูนย์

2.3 หลักการของเวอร์เนียร์ (Vernier Operation)

ค่าการสูญเสียพลังงานจากการวนรอบในโพรงสั่นพ้องจะขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่นำไปใช้ เช่น ค่าไฟเนส (Finesse) ที่สูงตั้งแต่ 500 ขึ้นไปจะมีค่าการสูญเสียในการวนรอบที่ต่ำกว่า 0.01 เดซิเบล ในด้านการสื่อสารที่ต้องการแบนด์วิดท์สูงจะใช้ค่าไฟเนสประมาณ 10 - 20 จึงจะเพียงพอแต่จะมีค่าการสูญเสียในการวนรอบที่สูงเท่ากับ 0.1 เดซิเบล โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นกับค่าดัชนีหักเหียงผล (Effective Refractive Index) รัศมีความโค้งของโพรงสั่นพ้อง และค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (Free Spectral Range: FSR)

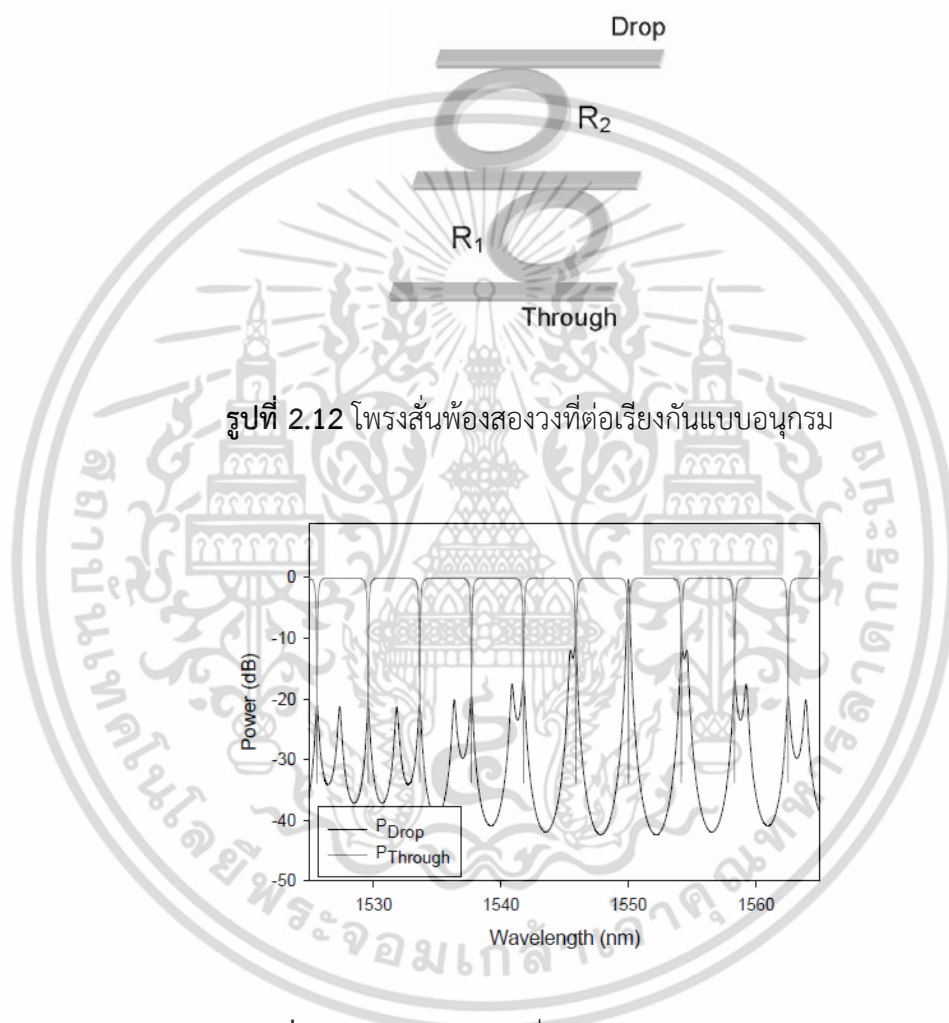
ปัญหาเมื่อค่าดัชนีหักเหียงผลสูงจะไม่สามารถทำให้โพรงสั่นพ้องกำเนิดค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระที่กว้างมากพอได้ และปัญหาจากการออกแบบโพรงสั่นพ้องที่มีขนาดเล็กต้องอาศัยการปรับจูนเฟสและดัชนีหักเหียงผล ซึ่งทำให้ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระลดลง วิธีแก้ปัญหาดังกล่าวจะใช้ปรากฏการณ์เวอร์เนียร์ (Vernier-effect) [3, 4] ที่เกิดขึ้นในโพรงสั่นพ้องที่มีขนาดต่างกัน เมื่อนำมาต่อเรียงกันจะได้เอาต์พุตที่มีค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระกว้างขึ้น ตัวอย่างโพรงสั่นพ้องสองวงโดยวงแรกจะมีรัศมี (R_1) เท่ากับ 45 ไมโครเมตร และวงที่สองมีรัศมี (R_2) เท่ากับ 50 ไมโครเมตร ที่เอาต์พุตของโพรงสั่นพ้องที่หนึ่งให้ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระเท่ากับ 4.5 นาโนเมตร และวงที่สองให้ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระเท่ากับ 4 นาโนเมตร เมื่อนำโพรงสั่นพ้องทั้งสองวงมาต่อเรียงกันแบบอนุกรมดังรูปที่ 2.10 โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (κ) ลำดับที่หนึ่งถึงสี่เท่ากับ 0.4 และค่าการลดทอน

ความเข้มแสง (α_{dB}) เท่ากับ 1 เดซิเบลต่อเซนติเมตร ผลลัพธ์คือเอาต์พุตที่วัดได้นั้นมีค่าพิสัยสเปกตรัมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาตให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิสระเพิ่มขึ้นเท่ากับ 36 นาโนเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ทั้งนี้การคำนวณค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระที่เพิ่มขึ้นหาได้จากสมการ

$$M \cdot FSR_1 = N \cdot FSR_2 = FSR_{Tot} \quad (2.15)$$

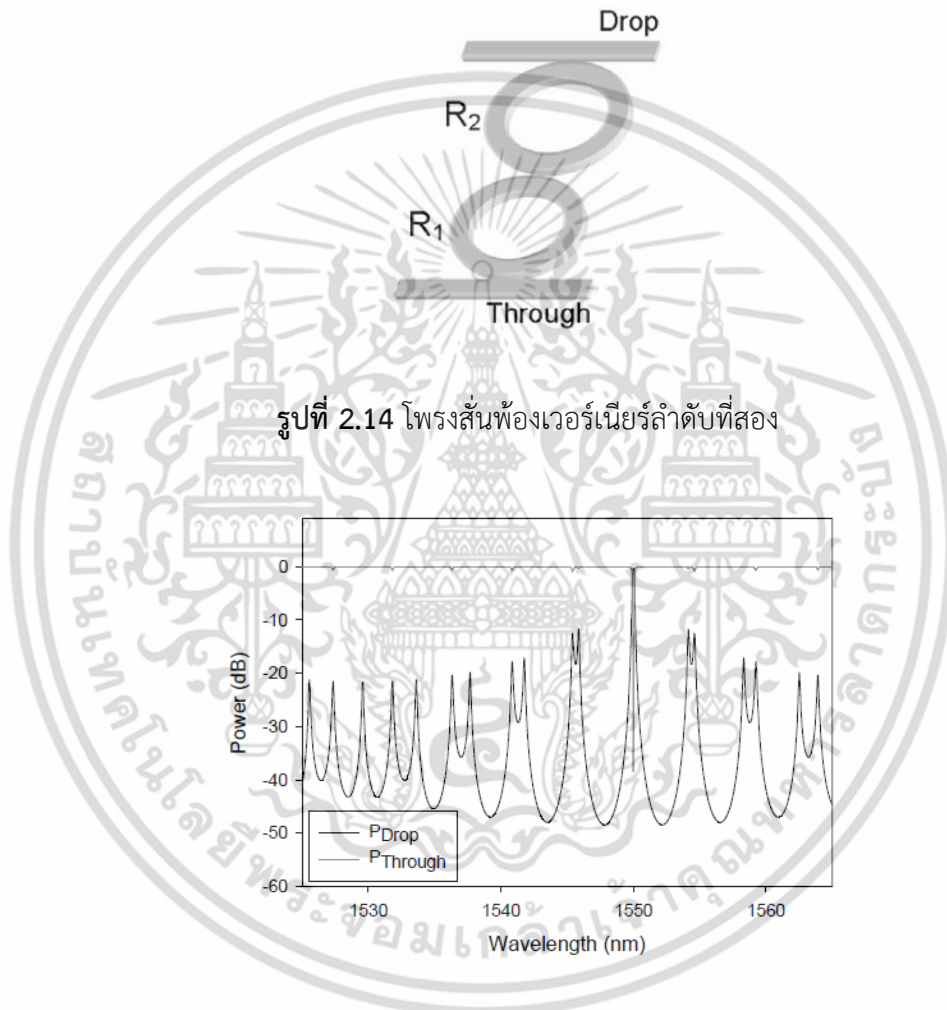
โดยที่ M และ N คือ เลขจำนวนเต็ม ซึ่งค่า M จะมากกว่าค่า N เสมอ



รูปที่ 2.13 กราฟเอาต์พุตที่ดรอพพอร์ตและธรูพอร์ต

ข้อเสียที่สำคัญของฟิลเตอร์ชนิดนี้คือ เกิดพุด้านข้าง (side lobes) ระหว่างสัญญาณที่คาบเกี่ยวกัน ทำให้ค่ากำลังเอาต์พุตที่ดรอพพอร์ตลดลง -11 เดซิเบล ที่ตำแหน่งของพุด้านข้างที่สูงที่สุด เป็นผลให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณเมื่อนำไปใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดคาร์ซีและค่าไฟเนสของโพรงสั้นพ้องเพื่อลดปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพได้จากตัวอย่างงานวิจัย [5] อีกปัญหาหนึ่งคือ เอาต์พุตที่ธรูพอร์ตของโพรงสั้นพ้องวงหนึ่งจะใช้ท่อนำคลื่น (Waveguide) เดียวกับเอาต์พุตจากดรอพพอร์ตของโพรงสั้นพ้องอีกวง ทำให้สัญญาณถูกลดทอนและค่ากำลังเอาต์พุตที่ดรอพพอร์ตลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิลเตอร์เวอร์เนียร์ลำดับที่สอง (second order) จะคล้ายกับแบบแรกแต่ไม่ใช่ท่อนำคลื่น คั่นระหว่างโพรงสั่นพ้องทั้งสองดังรูปที่ 2.14 โดยกำหนดให้โพรงสั่นพ้องวงแรกมีรัศมี (R_1) เท่ากับ 45 ไมโครเมตร วงที่สองมีรัศมี (R_2) เท่ากับ 50 ไมโครเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (κ) ลำดับที่หนึ่งกับสามเท่ากับ 0.4 ส่วนลำดับที่สองเท่ากับ 0.086 และค่าการลดทอนความเข้มแสง (α_{dB}) เท่ากับ 1 เดซิเบลต่อเซนติเมตร ผลลัพธ์ที่รูปพอร์ตนั้นกำหนดที่ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1550 นาโนเมตร และเอาต์พุตจากทรอปพอร์ตมีค่ากำลังที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟเอาต์พุตที่ทรอปพอร์ตและทรูพอร์ตของโพรงสั่นพ้องเวอร์เนียร์ลำดับที่สอง

อย่างไรก็ตามหลักการของเวอร์เนียร์นั้นช่วยเพิ่มค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระได้แต่มีข้อจำกัดคือ (1) ทำให้แถบความถี่ผ่าน (passband) ลดลง (2) การกรองด้วยแถบความถี่หยุด (stopband) ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของค่า $N:M$ (3) สมดุลระหว่างแถบผ่านกับแถบหยุดที่สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงแหวนสั่นพ้องและฟิลเตอร์แอดดรอป (Ring Resonator and Add/Drop Filter)

การประยุกต์ใช้วงแหวนสั่นพ้องสำหรับการทำงานเป็นตัวกรองช่วงความถี่ผ่าน (Band pass filter) ได้ถูกนำเสนอโดย E.A. Marcatili ในปี ค.ศ. 1969 [6] โดยตัวกรองความถี่ดังกล่าว มีลักษณะดังรูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วยตัวนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยชั้นในของตัวนำคลื่นนี้ใช้สารที่มีค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) ค่าหนึ่ง ซึ่งถูกหุ้มด้วยสารที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่น้อยกว่าอีกชั้นหนึ่ง

การวิเคราะห์สมการคุณลักษณะการส่งผ่านของตัวกรองความถี่นั้นขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้สารในการสร้างตัวนำสัญญาณที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น AlGaAs-GaAs [7, 8] หรือ Si-SiO₂ [9] และ Si₃N₄-SiO₂ [10] โดยมีขนาดรัศมีของวงแหวนสั่นพ้องที่ใช้งานอยู่ที่ 5 ไมโครเมตร และ 30 ไมโครเมตร ทำให้ได้แถบสัญญาณที่มีค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) อยู่ระหว่าง 20 และ 30 นาโนเมตร ส่วนวงแหวนสั่นพ้องชนิด Passive จะใช้สาร GaInAsP [11] และ AlGaAs-GaAs [12] ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานของตัวกรองสัญญาณจะถูกจำกัดโดยการสูญเสียเนื่องจากการโค้งงอของแท่งตัวนำและการกระเจิงของแสงในตัววงแหวนสั่นพ้อง อย่างไรก็ตามการสูญเสียดังกล่าวอาจได้รับการชดเชยด้วยการเพิ่มสารชนิด Active เข้าไปในตัวกรองสัญญาณที่ใช้งาน



รูปที่ 2.16 วงแหวนสั่นพ้อง (Ring Resonator)

2.4.1 วงแหวนสั่นพ้อง (Ring Resonator)

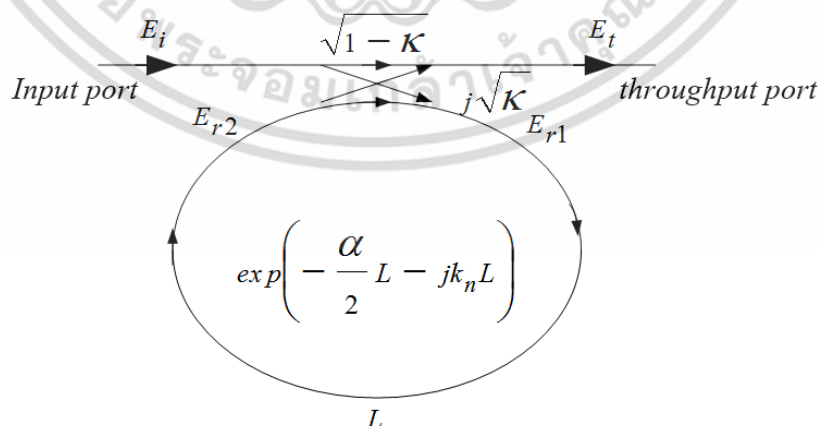
วงแหวนสั่นพ้องที่มีโครงสร้างแบบคัปปลิงเดี่ยว (Single coupler ring resonator: SCRR) แสดงดังรูปที่ 2.14 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสนามไฟฟ้า E_i ผ่านตัวคัปปลิง (Coupling) สัญญาณส่วนหนึ่งจะถูกแบ่งผ่านเข้าไปในส่วนของตัวนำวงแหวน ได้เป็นสนามไฟฟ้า E_r และสัญญาณส่วนที่เหลือจากการแบ่งผ่านข้างต้น จะส่งผ่านออกไปที่ปลายอีกข้างหนึ่งของตัวนำคลื่นที่เป็นเส้นตรง ได้เป็นสนามไฟฟ้า E_t โดยการพิจารณาค่าของการคัปปลิงระหว่างแท่งตัวนำคลื่นเส้นตรง กับตัวนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นวงแหวน จะทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณของสัญญาณที่ถูกคัปปลิงจากตัวนำคลื่นเส้นตรง ไปยังตัวนำคลื่นวงแหวน หรือจากตัวนำคลื่นวงแหวน ไปยังตัวนำคลื่นเส้นตรงได้ โดยค่าการคัปปลิงนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างและความยาวของช่วงใกล้สัมผัสระหว่างตัวนำทั้งสอง จากโครงสร้างของวงแหวนสั้นพ้องเช่นนี้ จะมีผลให้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นบางช่วงเท่านั้นที่จะเกิดกำทอน (Resonance) ขึ้นภายในตัวนำคลื่นแบบวงแหวน และสามารถประยุกต์ใช้งานสำหรับการเลือกกรองสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการได้ โดยการเลือกปรับขนาดของวงแหวนสั้นพ้องที่เหมาะสม ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.12)

$$m\lambda_m = nL \quad (2.16)$$

โดย m คือ เลขโหมดจำนวนเต็ม (Longitudinal mode number) λ_m คือช่วงความยาวคลื่นที่เกิดกำทอน n คือดัชนีหักเหของสารที่ใช้ทำตัวนำคลื่นแบบวงแหวน และ L คือความยาวเส้นรอบวงของวงแหวนสั้นพ้อง

คุณลักษณะการส่งผ่านของวงแหวนสั้นพ้องที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.17 สามารถพิจารณาได้จากการวิเคราะห์ Z-transform โดย L แทนความยาวเส้นรอบวงของวงแหวนสั้นพ้อง ($L = 2\pi R$ เมื่อ R แทนรัศมีของวงแหวนสั้นพ้อง) K คือค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง (Coupling coefficient) จะได้ว่าตัวแปร Z-transform เป็น $z^{-1} = \exp^{-jk_n L}$ โดยที่ $k_n = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$ คือค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น และ n_{eff} คือค่าดัชนีหักเหของสารที่ใช้สร้างตัวนำคลื่น เมื่อคลื่นแสงเกิดการแพร่กระจายผ่านตัวนำคลื่นที่เป็นวงแหวนจะมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายเป็น $a = \exp^{-\alpha L/2}$ โดย α คือการลดทอนของความเข้มของแสงภายในตัวนำคลื่น ดังนั้นความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ขาออก E_t เทียบกับสนามไฟฟ้าที่ขาเข้า E_i จะสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.17) – (2.20)



รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงวงแหวนสั้นพ้องแบบคัปปลิงเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_t = \sqrt{(1-\gamma)} \cdot [E_i \cdot \sqrt{1-\kappa} + j \cdot E_{r2} \sqrt{\kappa}] \quad (2.17)$$

$$E_{r1} = \sqrt{(1-\gamma)} \cdot [j \cdot E_i \cdot \sqrt{\kappa} + E_{r2} \cdot \sqrt{1-\kappa}] \quad (2.18)$$

$$E_{r2} = E_{r1} \cdot a z^{-1} \quad (2.19)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ของ E_t/E_i สามารถพิจารณาได้ดังสมการ (2.20)

$$\frac{E_t}{E_i} = \sqrt{(1-\gamma)} \cdot \left[\frac{\sqrt{1-\kappa} - (1-\gamma)^{1/2} \cdot a z^{-1}}{1 - (1-\gamma)^{1/2} \cdot \sqrt{1-\kappa} \cdot a z^{-1}} \right] \quad (2.20)$$

จากสมการคุณลักษณะการส่งผ่าน (2.20) สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณแสงขาออก I_t และความเข้มของสัญญาณแสงขาเข้า I_i ได้ดังสมการที่ (2.21)

$$T = \frac{I_t}{I_i}(\phi) = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = D^2 \cdot \left[\frac{(1-x^2) \cdot (1-c^2)}{(1-x \cdot c)^2 + 4 \cdot x \cdot c \cdot \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right] \quad (2.21)$$

โดยกำหนดให้

$$D = \sqrt{(1-\gamma)}$$

$$x = D \cdot \exp^{-\alpha L/2}$$

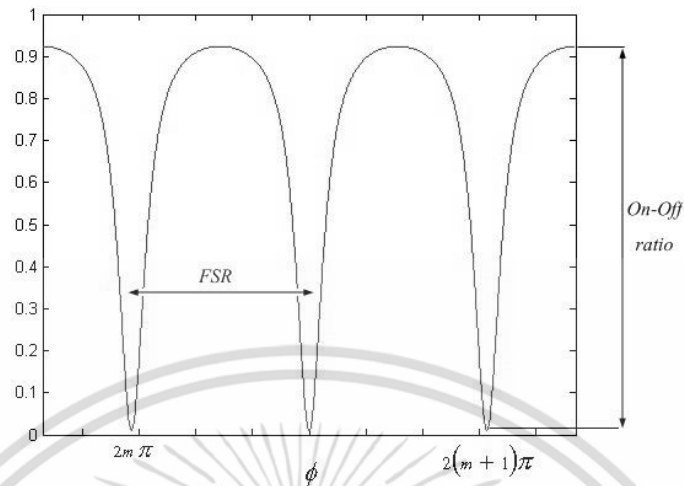
(2.22)

$$c = \sqrt{1-\kappa}$$

$$\phi = k_n \cdot L$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

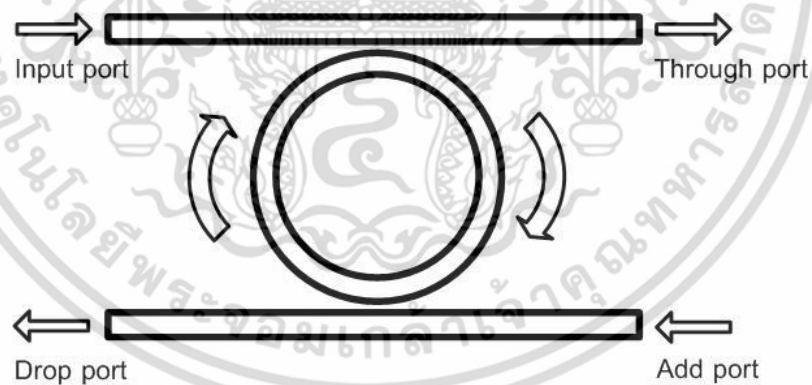
สามารถจำลองผลการส่งผ่านของวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงเดี่ยวได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผลการส่งผ่านของวงแหวนสั่นพ้องแบบคัปปลิงเดี่ยว

2.4.2 ฟิลเตอร์แอดดรอป (Add/Drop Filter)

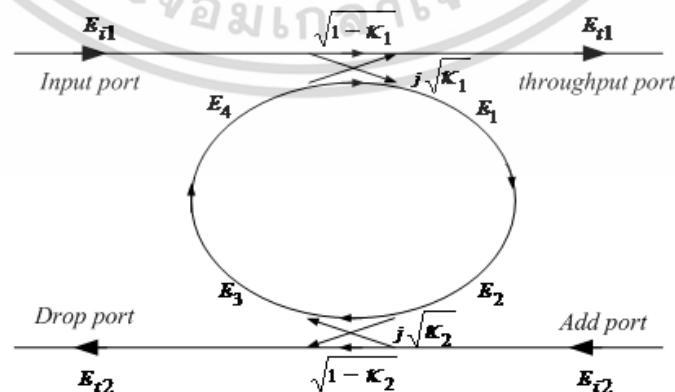
ฟิลเตอร์แอดดรอปที่มีโครงสร้างแบบคัปปลิงคู่ (Double coupler ring resonator: DCRR) แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ฟิลเตอร์แอดดรอป (Add/Drop Filter)

ประกอบด้วยวงแหวนวางอยู่ระหว่างท่อนำคลื่นแบบขนานสองแท่งในระนาบเดียวกัน โดยมีพอร์ตที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบภายนอกได้ทั้งหมดสี่พอร์ต คือส่วนที่ใช้สำหรับป้อนสัญญาณเข้าได้แก่ Input port และ Add port สำหรับส่วนที่ให้สัญญาณออกคือ Through port และ Drop port โดยทั่วไปการทำงานของวงแหวนสั่นพ้องอธิบายได้โดยการเกิดปฏิสัมพันธ์กัน (Interaction) ของคลื่นแสงความถี่ต่างๆที่แพร่กระจาย (Propagation) ไปตามท่อนำคลื่นแล้วเกิดการแทรกสอดและเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำทอน (Resonance) ขึ้นภายในท่อนำคลื่น เช่น เมื่อทำการป้อนสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งเข้าไปที่ Input port สัญญาณแสงนี้จะแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่นแท่งตรงส่วนบน (ท่อนำคลื่นที่เชื่อม Input port และ Through port) และสัญญาณบางส่วนจะถูกแบ่งผ่านจุดคัปปลิงด้านบน (Coupling1) แล้วแพร่กระจายเข้าไปในท่อนำคลื่นในส่วนที่เป็นวงแหวนและผ่านจุดคัปปลิงด้านล่าง (Coupling2) ซึ่งจะทำให้การแบ่งสัญญาณบางส่วนให้ไปปรากฏออกที่ Drop port สัญญาณส่วนที่เหลือจากการคัปปลิงครั้งที่สองจะแพร่กระจายต่อไปตามท่อนำคลื่นวงแหวนจนถึงจุดคัปปลิงด้านบนอีกครั้ง และเกิดการแทรกสอดกับสัญญาณใหม่ที่ถูkcัปปลิงเข้ามาจากท่อนำคลื่นแท่งตรงส่วนบน ด้วยรูปแบบการทำงานในลักษณะดังกล่าว การเกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงนี้จะเข้าไปในลักษณะ “เสริมกัน” หรือ “หักล้างกัน” นั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวงแหวนสั้นพ้องว่าสร้างขึ้นจากสารชนิดใด มีขนาดของวงแหวนเท่าใด และค่าการคัปปลิงเป็นสำคัญ กล่าวคือหากสัญญาณที่เหลือจากการคัปปลิงครั้งที่สอง (Coupling2) แพร่กระจายไปจนถึงจุดคัปปลิงครั้งแรก (Coupling1) มีเฟส “ตรงกันข้าม” กับสัญญาณใหม่ที่แพร่กระจายเข้ามาทำให้เกิดการแทรกสอดแบบ “หักล้างกัน” จึงได้สัญญาณรวมที่เหลืออยู่ในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนมีกำลังน้อยลง ส่งผลให้สัญญาณขาออกที่ Drop port มีกำลังน้อยลงเช่นกัน และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “สภาวะกำทอนปิด” (Off resonance condition) ส่วนสัญญาณอินพุตที่เหลือจาก Input port ที่ไม่ได้ถูกคัปปลิงเข้าไปในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนจะแพร่กระจายออกไปที่ Through port ในทางตรงกันข้าม หากสัญญาณที่เหลือจากการคัปปลิงครั้งที่สอง (Coupling2) แพร่กระจายไปจนถึงจุดคัปปลิงแรก (Coupling1) มีเฟสที่ “ตรงกัน” กับสัญญาณที่แพร่กระจายเข้ามาใหม่ จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบ “เสริมกัน” ทำให้ได้สัญญาณรวมที่เหลืออยู่ในท่อนำคลื่นแบบวงแหวนมีกำลังมากขึ้น ส่งผลให้สัญญาณขาออกที่ Drop port มีกำลังมากขึ้นเช่นกัน และจะเหลือสัญญาณไปปรากฏที่ Through port น้อยลง ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “สภาวะกำทอน” (Resonance condition) สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายภายในท่อนำคลื่นดังรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงฟิลเตอร์แอดดรอป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ฟรีเชิงงานเพื่อการศึกษาศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_a = E_{i1} j\sqrt{\kappa_1} + E_b \sqrt{1-\kappa_1} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.23)$$

$$E_b = E_a \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.24)$$

$$E_a = \frac{E_{i1} j\sqrt{\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.25)$$

$$E_b = \frac{E_{i1} j\sqrt{\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \cdot \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad (2.26)$$

$$E_{i1} = E_b j\sqrt{\kappa_1} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} + E_{i1} \sqrt{1-\kappa_1} \quad (2.27)$$

$$E_{i2} = E_a j\sqrt{\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \quad \text{at } E_{i2} = 0 \quad (2.28)$$

โดย E_{i1} แทนสนามไฟฟ้าขาเข้าที่ Input port E_{i1} แทนสนามไฟฟ้าขาออกที่ Throughput port E_{i2} แทนสนามไฟฟ้าขาออกที่ Drop port E_a และ E_b แทนสนามไฟฟ้าที่ถูกคัปปลิ่งเข้าไปในวงแหวนสั้นห้อง κ_1 และ κ_2 คือสัมประสิทธิ์การคัปปลิ่งระหว่างตัวนำคลื่นเส้นตรงกับตัวนำคลื่นวงแหวน และ L แทนขนาดเส้นรอบวงของวงแหวน จากสมการที่ (2.23) ถึง (2.28) สามารถสร้างสมการส่งผ่านสำหรับ Throughput port และ Drop port ได้ดังสมการ (2.30) และ (2.31) ตามลำดับ

$$\frac{E_{i1}}{E_{i1}} = \frac{-\kappa_1 \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L} + \sqrt{1-\kappa_1} - (1-\kappa_1) \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.29)$$

$$\frac{E_{i1}}{E_{i1}} = \frac{-\sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L} + \sqrt{1-\kappa_1}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.30)$$

$$\frac{E_{i2}}{E_{i1}} = \frac{-\sqrt{\kappa_1 \kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}}}{1 - \sqrt{1-\kappa_1} \sqrt{1-\kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2} - jk_n L}} \quad (2.31)$$

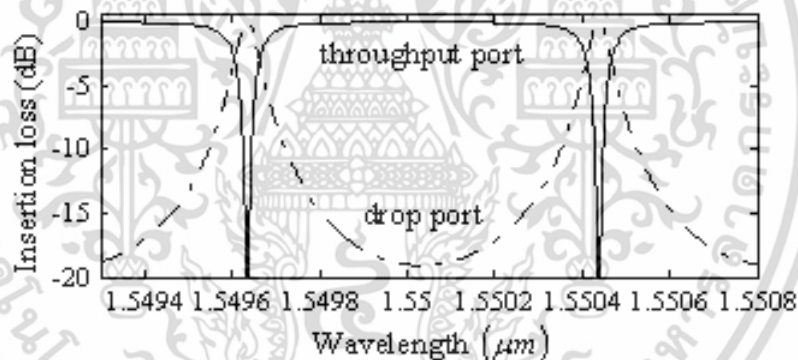
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการส่งผ่าน (2.30) และ (2.31) สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณแสงขาออกที่ Throughput port: I_{t1} กับความเข้มของสัญญาณแสงขาเข้าที่ Input port: I_{i1} และความเข้มของสัญญาณแสงขาออกที่ Drop port: I_{t2} กับความเข้มของสัญญาณแสงขาเข้าที่ Input port: I_{i1} ได้ดังสมการที่ (2.32) และ (2.33)

$$\frac{I_{t1}}{I_{i1}} = \left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{1 - \kappa_1 - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2}} \cos(k_n L) + (1 - \kappa_2) e^{-\alpha L}}{1 + (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2}} \cos(k_n L)} \quad (2.32)$$

$$\frac{I_{t2}}{I_{i1}} = \left| \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \right|^2 = \frac{\kappa_1 \kappa_2 e^{-\frac{\alpha L}{2}}}{1 + (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2) e^{-\alpha L} - 2\sqrt{1 - \kappa_1} \sqrt{1 - \kappa_2} e^{-\frac{\alpha L}{2}} \cos(k_n L)} \quad (2.33)$$

สามารถจำลองผลการส่งผ่านของฟิลเตอร์แอดดรอปได้ดังรูปที่ 2.21

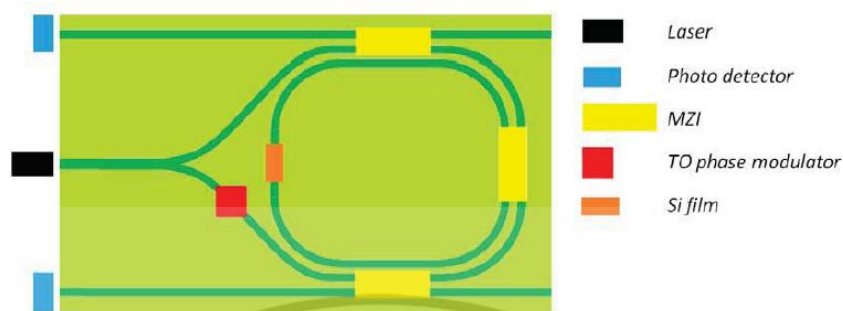


รูปที่ 2.21 ผลการส่งผ่านของฟิลเตอร์แอดดรอป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

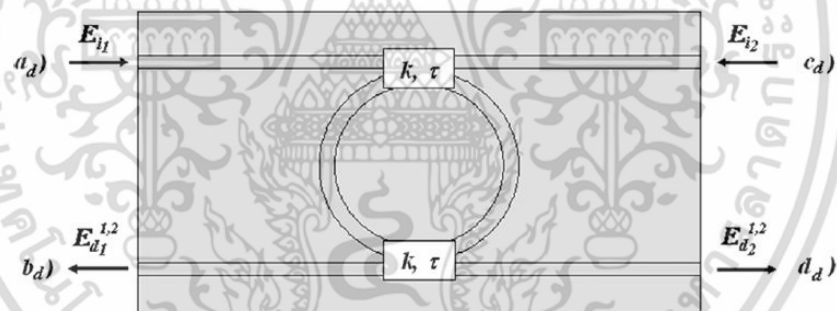
วงแหวนสั่นพ้องถูกพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพเรื่อยมาจนได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน หนึ่งในนั้นคือเซนเซอร์โฟโตนิกส์เชิงแสง อุปกรณ์ดังกล่าวเป็นแบบ Passive อาศัยการบ่อนำแสงสองลำในทิศทางและทวนเข็มนาฬิกา เพื่อใช้วัดความต่างเฟสของสัญญาณความถี่ที่กำหนด ด้วยอัตราความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ เซนเซอร์โฟโตนิกส์เชิงแสงจะประกอบไปด้วยวงแหวนสั่นพ้องและท่อนำแสงที่มีลักษณะแตกต่างกันไปเช่น งานวิจัยของ Suzuki และคณะ [13] ได้ออกแบบโฟโตนิกส์ขนาดไมโครแบบสั่นพ้องลงบนแผ่นซิลิกา โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเลเซอร์ความยาวคลื่นที่ 1,550 นาโนเมตรป้อนเข้าสู่ท่อนำคลื่นที่มีความยาวทั้งหมด 14.8 เซนติเมตร สามารถวัดค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ได้ที่ 10 องศาต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 2.22



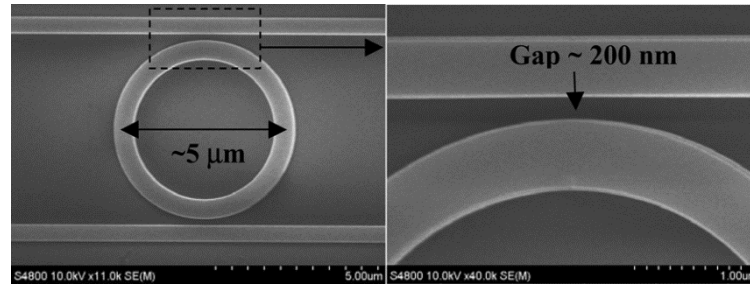
รูปที่ 2.22 ใยโรเซิงแสงขนาดไมโครแบบเส้นพ้องบนแผ่นซิลิกา

เพื่อลดขนาดของตัวนำสัญญาณแสงจึงมีงานวิจัยของ Caterina และคณะ [14] ได้นำเสนอใยโรสโคปเชิงแสงโดยใช้ฟิลเตอร์แอดดรอป ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเส้นพ้องรัศมี 2.3 เซนติเมตร และท่อนำคลื่นเส้นตรงสองเส้นที่คัปปลิงอยู่ด้านบนและล่างของวงแหวน ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ใยโรสโคปเชิงแสงโดยใช้ฟิลเตอร์แอดดรอป

สัญญาณแสงอินพุตจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่พอร์ต a_d และ พอร์ต c_d สามารถวัดสัญญาณแสงเอาต์พุตที่พอร์ต b_d และ พอร์ต d_d เพื่อทำการเปรียบเทียบความต่างเฟสที่เกิดขึ้นตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค โดยวัดค่า Sensitivity ได้ 8 องศาต่อชั่วโมง โดยมีค่า κ เท่ากับ 0.1 การสร้างวงแหวนเส้นพ้องขนาดไมโครนั้นสามารถทำได้โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5 ไมโครเมตรจากงานวิจัยของ Shijun Xiao และคณะ [15] สามารถวัดค่า FSR ได้กว้างถึง 32 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แอดดรอปฟิลเตอร์ขนาด 5 ไมโครเมตร

นอกจากนี้งานวิจัยของ Scheuer และคณะ [16] ได้นำเสนอโคโนสโคปเชิงแสงชนิด (Coupled-Resonator Optical Waveguide: CROW) โดยนำวงแหวนสั่นพ้องมาเรียงต่อกันดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 โคโนสโคปเชิงแสง CROW

และอีกหนึ่งโครงสร้างที่คล้ายกันเรียกว่า (Side-Coupled Integrated Spaced-Sequence of Resonators: SCISSOR) เป็นงานวิจัยของ Mancinelli และคณะ [17] ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 โคโนสโคปเชิงแสง SCISSOR

ซึ่งการต่อวงแหวนสั่นพ้องในลักษณะเมตริกซ์นี้จะช่วยลดความเร็วของแสงและลดความเร็วกลุ่ม (group velocity) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สรุปท้ายบท

ในบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาของใจโรสโคปตั้งแต่ยุคแรกที่ใช้จานหมุนโดยอาศัยแรงตามหลักของโมเมนตัมเชิงมุม และพัฒนาการมาจนเป็นชิปอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ปรากฏการณ์ของแรงโครีโอลิส จากนั้นจึงมีการนำแสงเลเซอร์มาใช้ในการวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค อธิบายคุณลักษณะและหลักการทำงานของใจโรสโคปประเภทต่างๆ การวิเคราะห์สมการการส่งผ่านโดยใช้กราฟการไหลของสัญญาณ คุณสมบัติของความเป็นเวอริเนียร์ นำเสนอวงแหวนสั่นพ้องและฟิลเตอร์แอดดรอปพร้อมวิเคราะห์และจำลองผลการทำงาน เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาวิจัยในบทต่อไป สุดท้ายจึงนำเสนอตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้อ้างอิงและเปรียบเทียบผลการทดลอง โดยเป็นงานวิจัยที่ใช้วงแหวนสั่นพ้องในการทำงาน



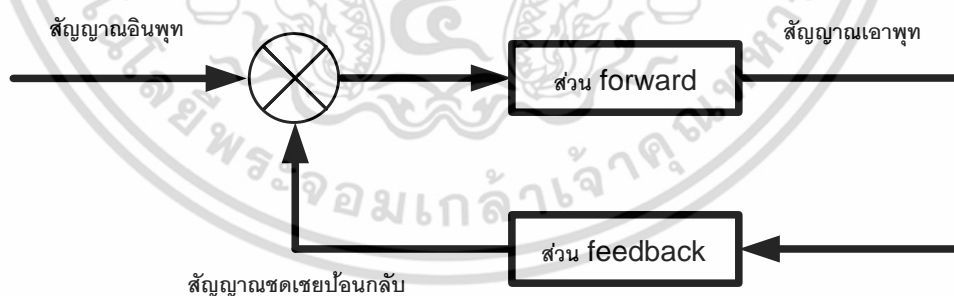
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

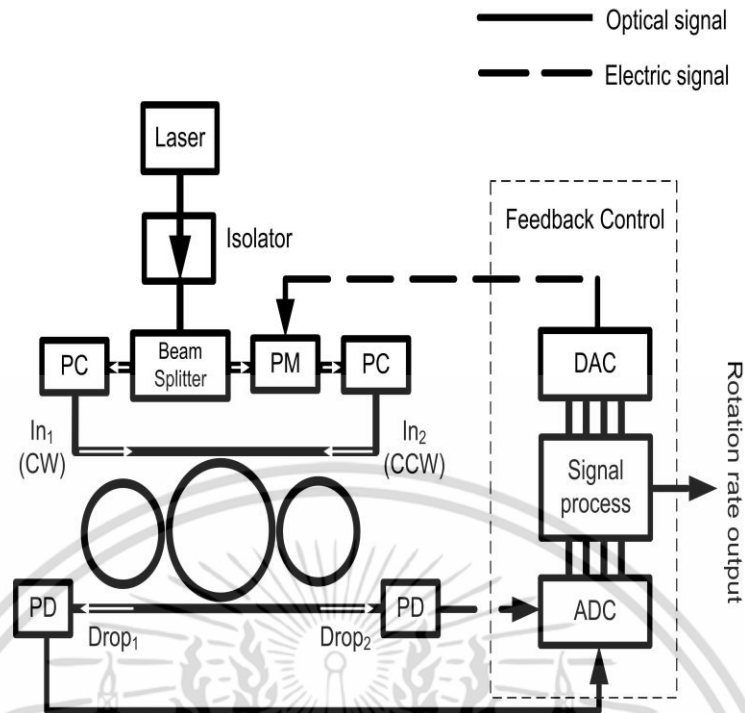
เซนเซอร์โรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า และวงจรถอดกลับ

ในบทนี้นำเสนอเซนเซอร์โรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า (PANDA Ring Resonator) ร่วมกับวงจรถอดกลับ (Feedback) เพื่อใช้ในการตรวจวัดทิศทางของการเคลื่อนที่ และรักษาระดับให้อุปกรณ์อยู่ในตำแหน่งที่สมดุลได้ โดยแผนผังอย่างง่ายของระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยส่วน forward (forward path) และส่วนป้อนกลับ (feedback path) การตรวจวัดค่าความคลาดเคลื่อนจะเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับค่าสัญญาณเอาต์พุตจริงหรือค่าที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุต และส่งสัญญาณที่เกิดจากผลต่างของสัญญาณทั้งสองนี้ออกไป

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วน forward ที่เป็นอุปกรณ์เชิงแสง (Optical Device) เช่น แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด (ECLD) ไอโซเลเตอร์ (Isolator) โพลารไรเซอร์ (Polarizer) มอดูเลตเฟส (Phase Modulator) ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เป็นต้น และส่วนป้อนกลับที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) หน่วยประมวลสัญญาณ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) และตัวกำเนิดสัญญาณไบแอสที่ช่วยชดเชยการเลื่อนของเฟสจากปรากฏการณ์แซ็กเน็คดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



รูปที่ 3.2 เซนเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนเส้นพ้องแพนด้าและวงจรถ้อนกลับ

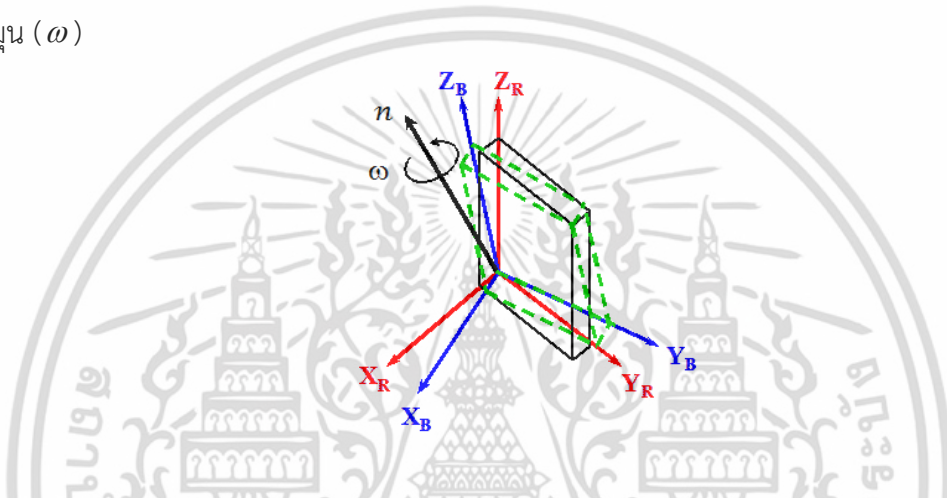
3.1 คุณสมบัติของเซนเซอร์ไจโรเชิงแสง

ลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงถูกป้อนเข้าสู่วงแหวนเส้นพ้องโดยลำแสงส่วนหนึ่งจะถูกคัปปลิ่งเข้าสู่อินพุตที่หนึ่งและมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะถูกคัปปลิ่งที่อินพุตที่สองและมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ลำแสงที่เดินทางวนอยู่ในโพรงเส้นพ้องถ้ามีความถี่ที่ตรงกับความถี่กำหนดของโพรงเส้นพ้อง ลำแสงที่ความถี่นั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาทางดรอพพอร์ตที่หนึ่งและสอง ซึ่งลำแสงที่ได้จะมีความต่างเฟสตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค จึงต้องใช้วงจรถ้อนกลับเพื่อสร้างคลื่นที่มีความต่างเฟส (ϕ_b) มาหักล้างกับความต่างเฟสของคลื่นทั้งสอง ($\Delta\phi$) ที่เกิดขึ้น เมื่อสัญญาณแสงที่ได้จากดรอพพอร์ตทั้งสองพอร์ตจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลโดยผ่านตัวตรวจจับแสง (Photodetector) สัญญาณดังกล่าวจะถูกมอดูเลตและประมวลผลเป็นเอาต์พุต จากนั้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อกด้วยตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกและมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อให้ได้สัญญาณคลื่นที่มีเฟสตรงกัน พร้อมกับป้อนสัญญาณกลับไปอินพุตของวงแหวนเส้นพ้องผ่านตัวมอดูเลตเฟส (PM) จากหลักการทำงานเบื้องต้นของไจโรสโคปเชิงแสงโดยใช้วงแหวนเส้นพ้องร่วมกับวงจรถ้อนกลับเพื่อวัดความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตทั้งสองและสร้างสัญญาณที่มีเฟสใหม่มาหักล้าง ทำให้ไม่เกิดสัญญาณที่มีความต่างเฟสในระบบและสามารถนำไปใช้งานในวัตถุหรือพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

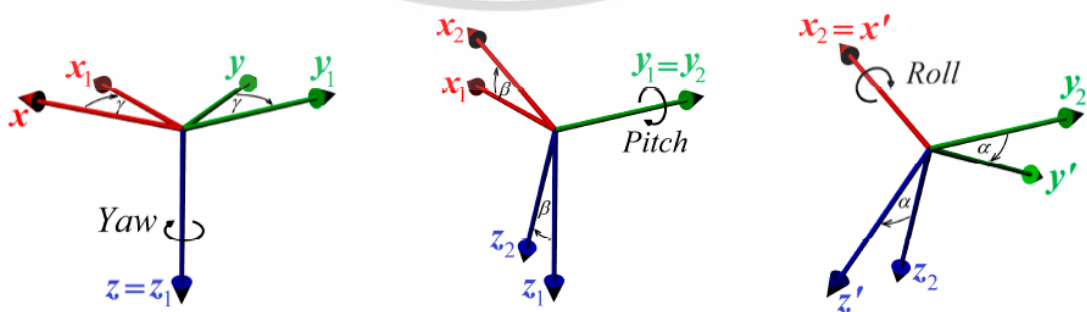
3.2 การวิเคราะห์สมการการส่งผ่าน

การระบุตำแหน่งของวัตถุในอากาศสามารถพิจารณาได้จากการวางตัว (Attitude) สมมติวัตถุในอากาศที่มีแกน (X_R Y_R Z_R) เป็นแกนของระบบพิกัดอ้างอิง (reference frame coordinate) และวัตถุดังกล่าวก็มีระบบพิกัดของตนเองเช่นกันที่เรียกว่า (body-fixed frame coordinate) (X_B Y_B Z_B) การหมุนของวัตถุในเชิงกลศาสตร์ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีแกนการหมุนเพียงหนึ่งแกน (n) และมุมการหมุนเพียงหนึ่งมุม (ω) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าวัตถุสามารถหมุนหรือแปลงจากระบบพิกัดหนึ่งไปยังอีกระบบพิกัดหนึ่งได้ โดยการหมุนดังกล่าวอาศัยแกนการหมุน (n) และมุมการหมุน (ω)



รูปที่ 3.3 การหมุนของวัตถุ

ตามหลักการหมุนของออยเลอร์ (Euler angles rotation) เป็นการหมุนแบบลำดับ (sequence rotation) โดยหมุนทีละแกนในระบบพิกัดสามมิติจนครบทั้งสามแกนได้แก่ มุมโรล (roll) มุมพิตช์ (pitch) และมุมยอ (yaw) โดยที่มุมโรลถูกกำหนดให้เป็นมุมของการหมุนรอบแกน (X) ในขณะที่มุมพิตช์ถูกกำหนดให้เป็นมุมของการหมุนรอบแกน (Y) และมุมยอถูกกำหนดให้เป็นมุมของการหมุนรอบแกน (Z) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การหมุนแบบลำดับ Yaw-Pitch-Roll

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเรียกการหมุนแบบลำดับ 3-2-1 คือ หมุนวัตถุรอบแกนที่ 3 (z) ก่อน แล้วตามด้วยการหมุนรอบแกนที่ 2 (y) และหมุนรอบแกนที่ 1 (x) เป็นลำดับสุดท้าย จากรูปที่ 3.4 ในการหมุนครั้งที่หนึ่งรอบแกน (z) ด้วยขนาดมุมหมุนยอ (γ) จะพบว่าแกน (z) ยังชี้ไปในทิศทางเดิมแต่แกน (x) และ (y) ชี้ไปในทิศทางใหม่คือ (x_1) และ (y_1) ตามลำดับ การหมุนครั้งที่สองรอบแกน (y_1) ซึ่งเป็นแกนใหม่ของ (y) ด้วยขนาดมุมหมุนพิตช์ (β) จะสังเกตว่าแกน (y_1) ยังชี้ไปในทิศทางเดิมแต่แกน (z_1) และ (x_1) ชี้ไปในทิศทางใหม่คือ (z_2) และ (x_2) ตามลำดับ สุดท้ายหมุนรอบแกน (x_2) ซึ่งเป็นแกนใหม่ของ (x_1) ด้วยขนาดมุมหมุนพิตช์ (α) จะสังเกตว่าแกน (x_2) ยังชี้ไปในทิศทางเดิมแต่แกน (y_2) และ (z_2) ชี้ไปในทิศทางใหม่คือ (y') และ (z') ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถสรุปการหมุนแบบลำดับได้ 6 ลำดับคือ

- 1) $x - y' - z''$ หรือ ลำดับ 1-2-3
- 2) $y - z' - x''$ หรือ ลำดับ 2-3-1
- 3) $z - x' - y''$ หรือ ลำดับ 3-1-2
- 4) $x - z' - y''$ หรือ ลำดับ 1-3-2
- 5) $z - y' - x''$ หรือ ลำดับ 3-2-1
- 6) $y - x' - z''$ หรือ ลำดับ 2-1-3

ในอุดมคติความเร็วเชิงมุมของวัตถุ (ω_b) คำนวณจากเอาต์พุตของไจโรสโคป (N_g) ได้จากสมการ

$$\omega_{ib}^b = K \cdot N_g \quad (3.1)$$

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนตามจริงหาได้จากสมการ

$$\omega_{ib}^b = b_g + C_g^b K_g N_g + \delta \varepsilon^b \quad (3.2)$$

ค่าผิดพลาดของไจโรสโคปที่เอาต์พุตอธิบายได้ด้วย

$$\varepsilon^b = b_g + (S_g + \Delta C_g^b) \omega_{ib}^b + \delta \varepsilon^b \quad (3.3)$$

โดยที่ b_g คือค่าผิดพลาดไจโรไบแอส K_g คือค่าสัมประสิทธิ์การสอบเทียบของไจโร S_g คือค่าไจโรสเกลแฟกเตอร์ ΔC_g^b คือค่าผิดพลาดในการติดตั้งไจโร และ $\delta \varepsilon^b$ คือค่าการเลื่อนแบบสุ่มของไจโร จากสมการที่ (3.3) สามารถเปลี่ยนรูปเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^b \\ \varepsilon_y^b \\ \varepsilon_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{gx} \\ b_{gy} \\ b_{gz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{gz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & E_{xz} & -E_{xy} \\ -E_{yz} & 0 & E_{yx} \\ E_{zy} & -E_{zx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x^b \\ \omega_y^b \\ \omega_z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \varepsilon_x^b \\ \delta \varepsilon_y^b \\ \delta \varepsilon_z^b \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

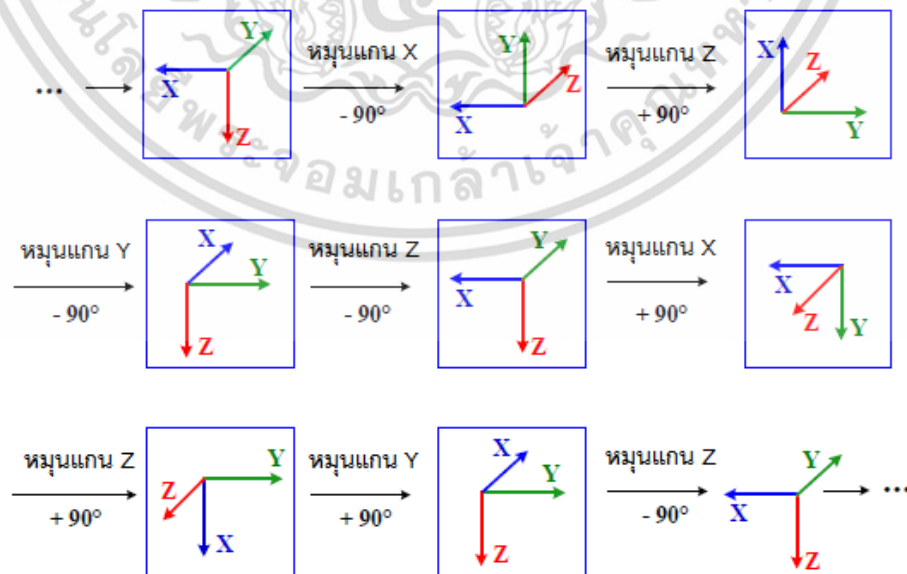
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\varepsilon_x^b, \varepsilon_y^b, \varepsilon_z^b$ หาได้จากสมการที่ (3.5)

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^b &= b_{gx} + S_{gx} \omega_x^b + E_{xz} \omega_y^b - E_{xy} \omega_z^b + \delta\varepsilon_x^b \\ \varepsilon_y^b &= b_{gy} + S_{gy} \omega_y^b - E_{yz} \omega_x^b + E_{yx} \omega_z^b + \delta\varepsilon_y^b \\ \varepsilon_z^b &= b_{gz} + S_{gz} \omega_z^b + E_{zy} \omega_x^b - E_{zx} \omega_y^b + \delta\varepsilon_z^b \end{aligned} \tag{3.5}$$

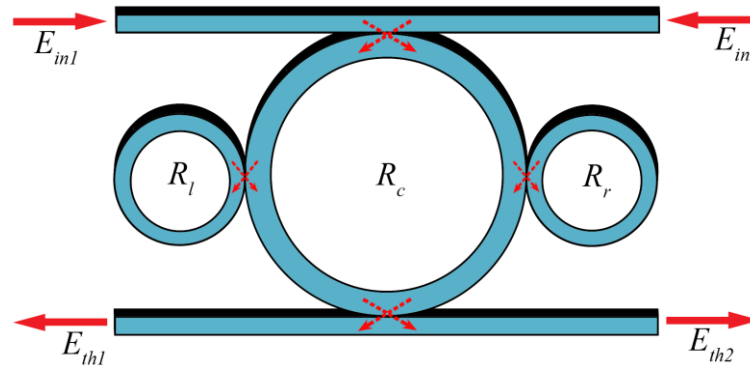
ซึ่ง $\varepsilon_x^b, \varepsilon_y^b, \varepsilon_z^b$ คือค่าผิดพลาดของไจโรเฮาด์พุต $\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$ คือค่าความเร็วเชิงมุมไจโรอินพุต $\delta\varepsilon_x^b, \delta\varepsilon_y^b, \delta\varepsilon_z^b$ คือค่าการเลื่อนแบบสุ่มของไจโรบนแกน x, y, z ตามลำดับ b_{gx}, b_{gy}, b_{gz} คือค่าผิดพลาดไจโรไบแอส, S_{gx}, S_{gy}, S_{gz} คือค่าไจโรสเกลแฟกเตอร์ $E_{xz}, E_{xy}, E_{yz}, E_{yx}, E_{zy}, E_{zx}$ คือค่าผิดพลาดในการติดตั้งไจโรตามแกน x, y, z ของไจโรสโคปตามลำดับ สามารถทำการสอบเทียบ (Calibration) ไจโรสโคปได้ 8 ขั้นตอนดังนี้

- 1) หมุนไจโรสโคปรอบแกน X เป็นมุมลบ 90 องศา
- 2) หมุนไจโรสโคปรอบแกน Z เป็นมุมบวก 90 องศา
- 3) หมุนไจโรสโคปรอบแกน Y เป็นมุมลบ 90 องศา
- 4) หมุนไจโรสโคปรอบแกน Z เป็นมุมลบ 90 องศา
- 5) หมุนไจโรสโคปรอบแกน X เป็นมุมบวก 90 องศา
- 6) หมุนไจโรสโคปรอบแกน Z เป็นมุมบวก 90 องศา
- 7) หมุนไจโรสโคปรอบแกน Y เป็นมุมบวก 90 องศา
- 8) หมุนไจโรสโคปรอบแกน Z เป็นมุมลบ 90 องศา



รูปที่ 3.5 การสอบเทียบ (Calibration) ของไจโรสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า

จากรูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของไอโรสโคปโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า ซึ่งประกอบไปด้วยวงแหวนขนาดไมโครเมตรจำนวนสามวง มีรัศมีของวงแหวนที่หนึ่ง (R_l) และสอง (R_r) เท่ากับ 2.5 ไมโครเมตร โดยเป็นตัววัดอ้างอิงและเซนเซอร์ตามลำดับ มีรัศมีของวงแหวนที่สาม (R_c) เท่ากับ 3.0 ไมโครเมตร เป็นวงแหวนกลางตามโครงสร้างซึ่งใช้รวมสัญญาณแสงและค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงเท่ากับ 0.9 ความแปรปรวนของค่าความเร็วเชิงมุมในการหมุนและความเร็วในแนวระนาบมีเฟสที่ต่างกันเกิดจากผลต่างทางเวลา (ΔT) ส่งผลให้เฟสเปลี่ยน (เวลาเคลื่อน) หลังจากการหมุนที่สามารถสังเกตและวัดได้

ในการดำเนินงานใช้พัลส์แสงสีเดียวจำนวนสองพัลส์เป็นอินพุต (E_{in}) ที่ส่งเข้ามาในระบบผ่านอินพุตพอร์ตหนึ่งและอินพุตพอร์ตสองตามลำดับ โดยมีค่าคงที่ของสนามเชิงแสง (E_0) และการมอดูเลตเฟสแบบสุ่มที่ได้จากเทอมของค่าการลดทอน (α) และค่าคงที่ของเฟส (ϕ_0) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการลดค่าที่ใกล้เคียงกันชั่วคราว ดังนั้นที่เวลาใดๆขึ้นกับค่าอินพุตของสนามเชิงแสง (E_{in}) ไม่รวมถึงเทอมการป้อนพลังงาน อธิบายได้ดังสมการ

$$E_{in}(t) = E_0 \exp[-\alpha L + j\phi_0(t)] \quad (3.6)$$

โดยที่ $L = 2\pi R$ คือระยะทางที่แสงผ่าน (ความยาวของท่อนำแสง)

จากการสันนิษฐานที่ว่าปรากฏการณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโพรงสั่นพ้องแบบวงแหวนคือชนิดเคอร์ (Kerr) จึงได้ค่าดัชนีการหักเหของแสงดังสมการ

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + n_2 \left(\frac{P}{A_{eff}} \right) \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง n_0 และ n_2 คือค่าดัชนีการหักเหแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามลำดับ

I และ P คือความเข้มของแสงและพลังงานของแสงตามลำดับ

A_{eff} คือขนาดของพื้นที่แกนกลางของอุปกรณ์ที่เกิดผล สำหรับโพรงสั้นพ้องแบบวงแหวนระดับไมโครเมตรและระดับนาโนเมตรจะมีขนาดของพื้นที่แกนกลางอยู่ระหว่าง 0.10 ถึง 0.50 ตารางไมโครเมตร

ค่าอนุกรมลิลส์เอาต์พุตของสัญญาณแสงเป็นอัตราส่วนระหว่างสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอินพุต $[E_{out}(t) \text{ and } E_{in}(t)]$ ในแต่ละรอบ แสดงได้ดังสมการ

$$\left| \frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} \right|^2 = (1-\gamma) \left[1 - \frac{(1-(1-\gamma)x^2)\kappa}{(1-x\sqrt{1-\gamma}\sqrt{1-\kappa})^2 + 4x\sqrt{1-\gamma}\sqrt{1-\kappa}\sin^2(\frac{\theta}{2})} \right] \quad (3.8)$$

เมื่อระบบหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม Ω_p สามารถวัดค่าเฟสที่เปลี่ยนไป (เวลาเคลื่อน) ที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองตามปรากฏการณ์แซ็กแน็คและวิเคราะห์สมการของโจโรสโคปแบบสามแกนในรูปแบบสนามไฟฟ้าได้จากสมการ

$$E_{12} = E_{11}Z_r \quad (3.9)$$

$$E_{22} = E_{21}Z_r \quad (3.10)$$

$$E_{11} = \beta_1 E_{in1} \quad (3.11)$$

$$E_{21} = \beta_r E_{12} \quad (3.12)$$

$$E_{in1} = \beta_2 E_{22} \quad (3.13)$$

โดย

$$\beta_1 = \left[\frac{(1-\gamma_1)}{1-(1-\gamma_1)\beta_r\beta_l Z_c^4} \right] \quad (3.14)$$

$$\beta_2 = \left[\frac{(1-\gamma_r)}{1-(1-\gamma_r)\beta_r\beta_l Z_c^4} \right] \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta_l = \left[\frac{\sqrt{(1-\gamma_l)(1-\kappa_l)} - (1-\gamma_l)Z_l}{1 - \sqrt{(1-\gamma_l)(1-\kappa_l)}Z_l} \right] \quad (3.16)$$

$$\beta_r = \left[\frac{\sqrt{(1-\gamma_r)(1-\kappa_r)} - (1-\gamma_r)Z_r}{1 - \sqrt{(1-\gamma_r)(1-\kappa_r)}Z_r} \right] \quad (3.17)$$

$$Z_l = e^{-\frac{\alpha}{4}L_l - j\kappa_n L_l} \quad (3.18)$$

$$Z_r = e^{-\frac{L_r}{4} - j\phi_{Rr}}, \quad \phi_{Rr} = \frac{2\pi}{\lambda} n \left(\frac{L_r D_r}{c} \Omega_p \right) \quad (3.19)$$

$$Z_c = e^{-\frac{\alpha}{8}L_c - j\phi_{Rc}}, \quad \phi_{Rc} = \frac{2\pi}{\lambda} n \left(L_c + \frac{L_c D_c}{c} \Omega_p \right) \quad (3.20)$$

ซึ่ง L_l , L_r และ L_c คือความยาวรอบวงแหวนด้านซ้าย (R_l) ด้านขวา (R_r) และวงกลาง (R_c) ตามลำดับ D_r และ D_c คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนด้านขวา (R_r) และวงกลาง (R_c) ตามลำดับ ϕ_{Rr} และ ϕ_{Rc} คือค่าการเลื่อนเฟสของวงแหวนด้านขวา (R_r) และวงกลาง (R_c) ตามลำดับ γ_l , γ_r และ γ_c คือค่าสูญเสียจากการคัปปลิงแสงของวงแหวนด้านซ้าย (R_l) ด้านขวา (R_r) และวงกลาง (R_c) ตามลำดับ κ_l , κ_r และ κ_c คือค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงแสงของวงแหวนด้านซ้าย (R_l) ด้านขวา (R_r) และวงกลาง (R_c) ตามลำดับ

ค่าออร์มัลไลซ์ความเข้มแสงที่เอาต์พุตของระบบเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสัมบูรณ์กำลังสองของสัญญาณที่ทรูพพอร์ตและสัญญาณที่อินพุตพอร์ต อธิบายได้ตามสมการ

$$\left| \frac{E_{th1}}{E_{in1}} \right|^2 = |\beta_r \beta_l \beta_c Z_c^2|^2 \quad (3.21)$$

$$\left| \frac{E_{th2}}{E_{in2}} \right|^2 = |\beta_l \beta_r \beta_c Z_c^2|^2 \quad (3.22)$$

โดยที่ β_l , β_r , β_l และ β_r คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ซึ่งผู้วิจัยทำการวิเคราะห์และได้สัญญาณที่เฟสเปลี่ยนเมื่อทำการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ของเซนเซอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$\delta\Omega = \frac{\lambda_0 L \sqrt{2FWHM}}{4A \cdot SNR} \quad (3.23)$$

โดย λ_0 คือความยาวคลื่นที่กำทอน

L คือความยาวของวงแหวน

A คือขนาดของวงแหวน

FWHM คือความกว้างของพัลส์ที่คำนวณได้จาก

$$\Gamma = \frac{f_0}{Q} \quad (3.24)$$

ซึ่ง f_0 คือความถี่ที่กำทอน

Q คือตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ของวงแหวน

หากต้องการค่าความไว ($\delta\Omega$) ในการตรวจจับที่สั้นลงจำเป็นต้องลดค่า FWHM หรือเพิ่มค่า Q ที่ความถี่เฉพาะ และเพิ่มค่า SNR เนื่องจากค่า Q จะขึ้นกับค่าการสูญเสียจากการเดินทางของแสง ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน และค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง

3.3 ผลการทดลองจากสมการคณิตศาสตร์

วัตถุประสงค์ในการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB แบ่งเป็น

- 1) เพื่อจำลองผลการส่งผ่านของสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นในวงแหวนสั้นพองแพนด้า
- 2) สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากสมการคณิตศาสตร์ที่กำหนด
- 3) หาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่วัดได้ขณะที่ค่าเฟสเปลี่ยนแปลง
- 4) สามารถคำนวณหาตัวชี้วัดประสิทธิภาพตามคุณลักษณะของโจโรสโคปได้

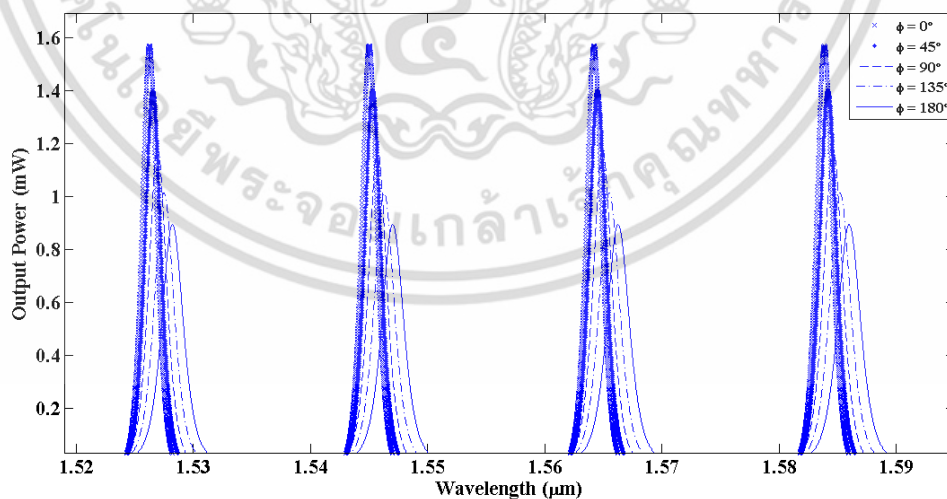
กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ความยาวคลื่น ขนาดรัศมีของวงแหวน มุมของเฟส ค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง ค่ากำลังอินพุต ค่าดัชนีหักเห และค่าลดทอนของสัญญาณดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB

พารามิเตอร์	ค่า
λ_c	1.55 μm
R_c	3.0 μm
$R_r = R_l$	2.5 μm
κ	0.1 – 0.9
ϕ	0° – 180°
P_{in}	10 mW
n_0	3.34
n_2	$2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^2\text{W}$
α	0.1 dB/cm

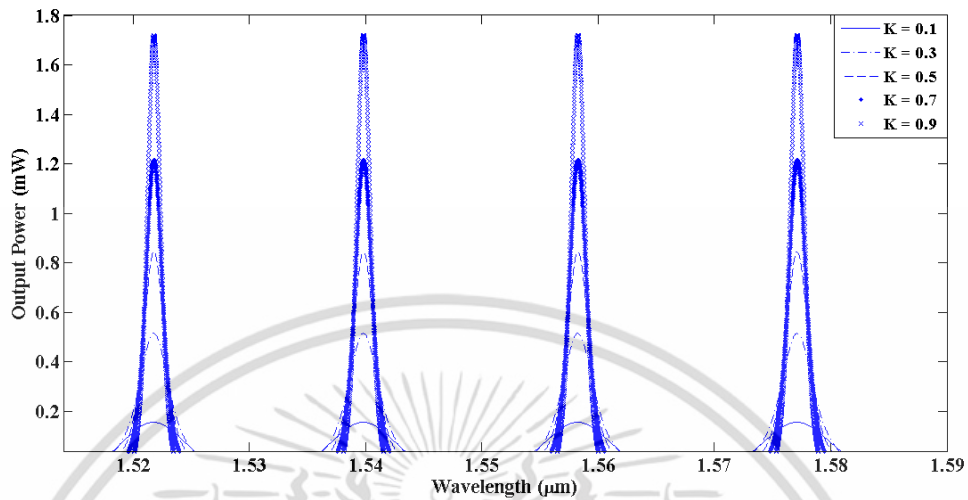
โดยจำลองป้อนแหล่งกำเนิดแสงไปยังอินพุตที่หนึ่ง (E_{in1}) และอินพุตที่สอง (E_{in2}) ในทิศทางกันข้ามกันจากรูปที่ 3.6 เมื่อสัญญาณในวงแหวนมีความถี่ที่ตรงกับความถี่กำทอน สัญญาณที่ความถี่นั้นจะออกไปยังเอาต์พุตที่หนึ่ง (E_{th1}) และเอาต์พุตที่สอง (E_{th2}) ในเวลาที่แตกต่างกันเนื่องจากการเลื่อนของเฟสตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค พบว่าเอาต์พุตของระบบคือสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าเฟสที่อยู่ระหว่าง 0 องศา ถึง 180 องศา เมื่อเฟสเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตลดลงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเลื่อนของความยาวคลื่นที่สามารถวัดได้ในหลายช่วงความยาวคลื่นที่กำทอน



รูปที่ 3.7 สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ตามค่าของเฟส (ϕ) ระหว่าง 0° ถึง 180°

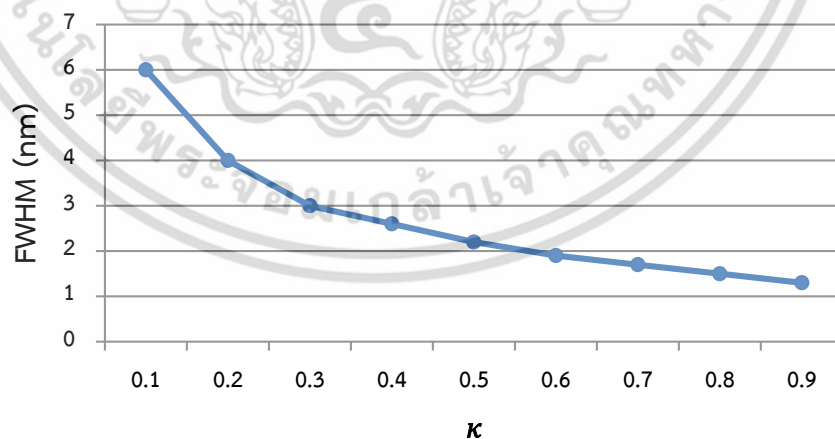
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิ่งระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิ่งเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.8



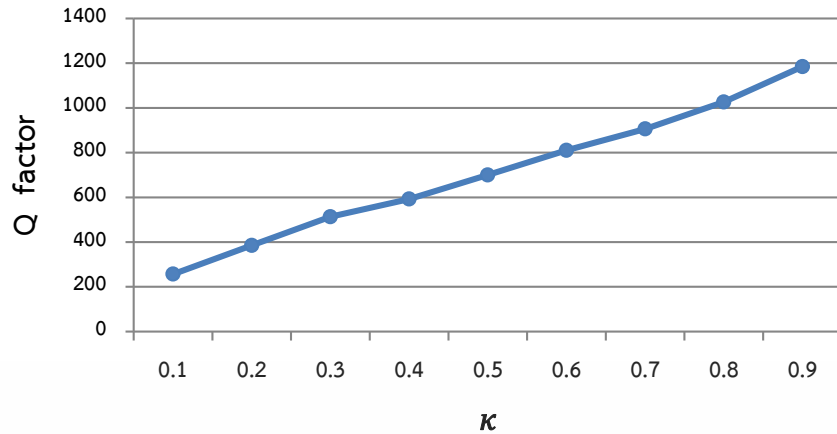
รูปที่ 3.8 สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้จากค่า K ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9

เมื่อพิจารณาค่าความกว้างของพัลส์ (FWHM) ตัวประกอบคุณภาพ (Q) และค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.11 ตามลำดับ สามารถวัดค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดคือ 0.0036 องศาต่อชั่วโมง ซึ่งถือว่ามีความไวที่สูง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิ่งเท่ากับ 0.9 จะได้ FWHM เท่ากับ 271 กิโลเฮิรตซ์ และค่า Q เท่ากับ 1185

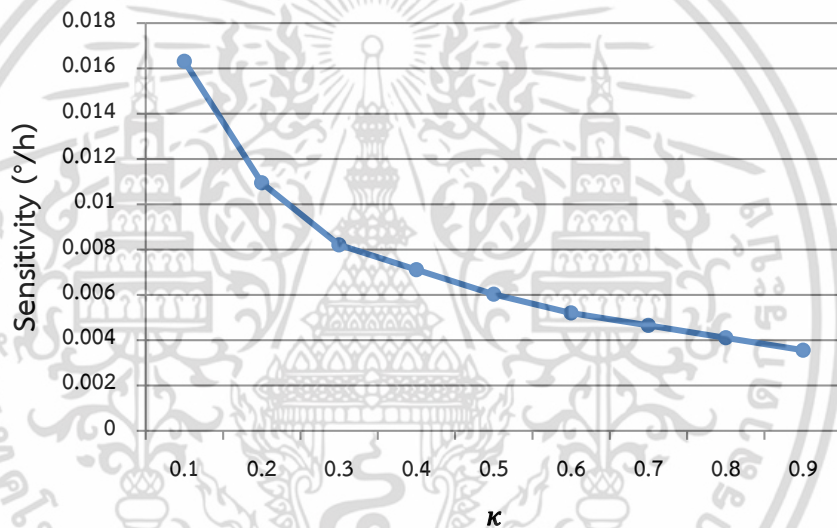


รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า FWHM กับค่า K ที่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q กับค่า κ ที่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sensitivity กับค่า κ ที่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9

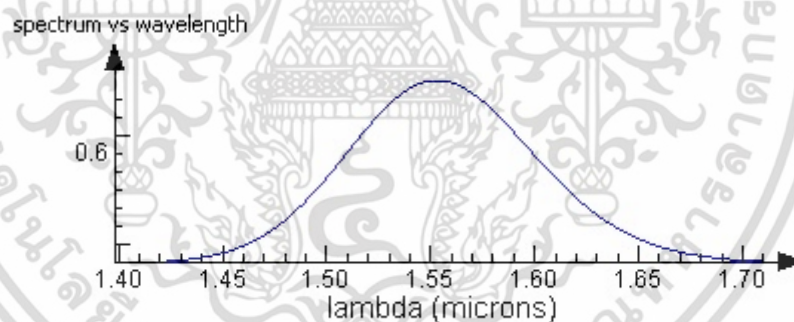
การจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถอธิบายหลักการทำงานของไจโรสโคปวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วางตัวได้จากสัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ในหลายช่วงความยาวคลื่นที่กำหนดแตกต่างกันเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดตามสมการคณิตศาสตร์ เมื่อค่าเฟสเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตลดลง และค่าสัมประสิทธิ์ของการคับปลิงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตและค่า Q เพิ่มขึ้น ส่วนค่า FWHM จะลดลง ส่งผลให้ได้ค่า Sensitivity มีค่าน้อยลงด้วย ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อการตรวจจับที่ต้องการค่าความไวที่สูง

3.4 ผลการทดลองจากโปรแกรม 3D FDTD

วัตถุประสงค์ในการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม 3D FDTD แบ่งเป็น

- 1) เพื่อจำลองผลการส่งผ่านของสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นในวงแหวนสั่นพ้องแพนด้า
- 2) สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญและออกแบบวงแหวนสั่นพ้องแพนด้าด้วยเทคนิค silicon on insulator
- 3) เปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากการหมุนในแนวแกน x แกน y และแกน z
- 4) สามารถชดเชยสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้วงจรป้อนกลับ

โปรแกรม 3D FDTD [18] เป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบและจำลองผลการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่กำหนดเพื่อวิเคราะห์ผลการทำงาน ซึ่งมีความแม่นยำและเป็นที่แพร่หลาย โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโครงสร้างโรตารีโคปเซียงแสงโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าแบบสามมิติในโปรแกรมหดดังกล่าว โดยใช้คอมโพเนนต์ที่สำคัญได้แก่ แผ่นเวเฟอร์ขนาด 22 ไมโครเมตร x 16 ไมโครเมตร ท่อนำคลื่นแบบยาวกว้าง 25 นาโนเมตร วงแหวนสามวงขนาด 2.50 ไมโครเมตร และ 3.0 ไมโครเมตร ซึ่งแหล่งกำเนิดที่ใช้เป็นคลื่นเกาส์เซียนพัลส์แบบต่อเนื่อง (GMCW) ที่มีความยาวคลื่น 1.5 ถึง 1.6 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แถบสเปกตรัมและความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด

โดยกำหนดเวลาในการจำลองผลที่ 4,000 เฟมโตวินาที (fs) และกำหนดพารามิเตอร์ของคอมโพเนนต์ดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของคอมโพเนนท์ในโปรแกรม 3D FDTD

คอมโพเนนท์	พารามิเตอร์	ค่า
Substrate Rectangle	x (μm)	0
	x span (μm)	22
	y (μm)	0
	y span (μm)	16
	z (μm)	-2
	z span (μm)	4
	Material	SiO ₂
	Source1	mode selection
wavelength start (μm)		1.5
wavelength stop (μm)		1.6
x (μm)		-4
x span (μm)		0
y (μm)		3.35
y span (μm)		3
z (μm)		0
z span (μm)		2
Source2		mode selection
	wavelength start (μm)	1.5
	wavelength stop (μm)	1.6
	x (μm)	4
	x span (μm)	0
	y (μm)	3.35
	y span (μm)	3
	z (μm)	0
	z span (μm)	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

คอมโพเนนต์	พารามิเตอร์	ค่า
FDTD Region		
	simulation time (fs)	4000
	mesh accuracy	3
	x (μm)	0
	x span (μm)	13
	y (μm)	0
	y span (μm)	10
	z (μm)	0
	z span (μm)	1
Straight Waveguide (1)		
	x (μm)	0
	x span (μm)	25
	y (μm)	3.35
	y span (μm)	0.4
	z (μm)	0.09
	z span (μm)	0.18
	Material	Si
Straight Waveguide (2)		
	x (μm)	0
	x span (μm)	25
	y (μm)	-3.35
	y span (μm)	0.4
	z (μm)	0.09
	z span (μm)	0.18
	material	Si

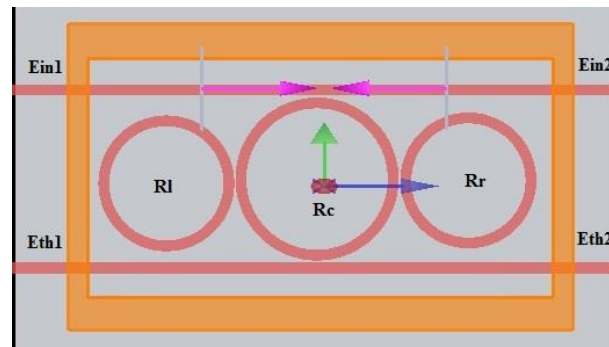
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

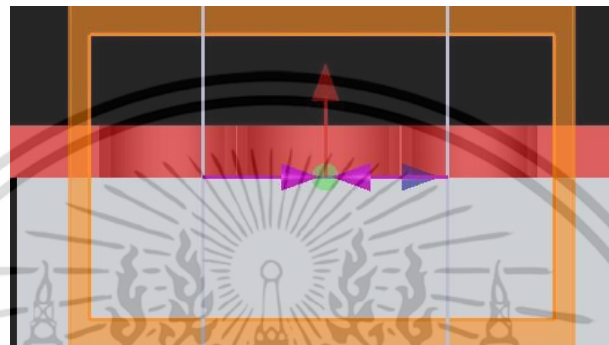
คอมโพเนนต์	พารามิเตอร์	ค่า
Center Ring		
	x (μm) , y (μm)	0
	z (μm)	0.09
	z span (μm)	0.18
	material	Si
	outer radius (μm)	3.0
	inner radius (μm)	2.6
Right Ring		
	x (μm)	4.75
	y (μm)	0
	z (μm)	0.09
	z span (μm)	0.18
	material	Si
	outer radius (μm)	2.5
inner radius (μm)	2.1	
Left Ring		
	x (μm)	-4.75
	y (μm)	0
	z (μm)	0.09
	z span (μm)	0.18
	material	Si
	outer radius (μm)	2.5
inner radius (μm)	2.1	

ตัวอย่างโครงสร้างของวงแหวนสี่เหลี่ยมในระนาบ XY ระนาบ XZ ระนาบ YZ และ มุมมองแบบ perspective ดังรูปที่ 3.13 ตามลำดับ

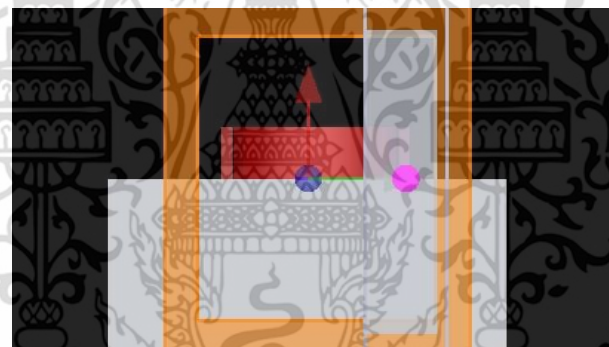
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



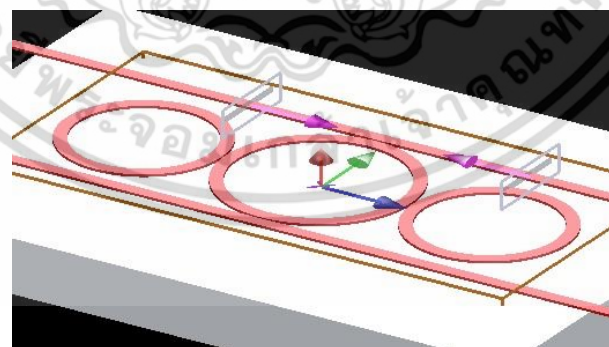
(ระนาบ XY)



(ระนาบ XZ)



(ระนาบ YZ)



(perspective)

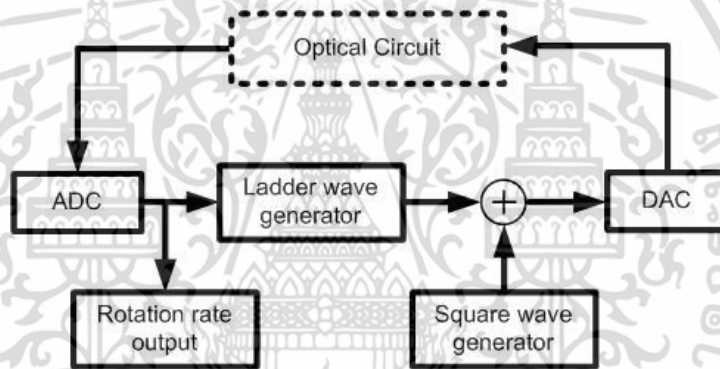
รูปที่ 3.13 โครงสร้างแบบสามมิติของไจโรสโคปเชิงแสงโดยใช่วงแหวนเส้นฟุ้งแพนด้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองเริ่มจากการป้อนแหล่งกำเนิดแสงไปยังอินพุตหนึ่ง (E_{in1}) และอินพุตสอง (E_{in2}) ในทิศทางตรงกันข้ามกันดังรูปที่ 3.13 และวัดสัญญาณที่ท่าออกมายังเอาต์พุตหนึ่ง (E_{out1}) และเอาต์พุตสอง (E_{out2}) โดยสัญญาณที่วัดได้นั้นสามารถพิจารณาได้ 4 สถานะดังนี้

- 1) สถานะสมดุล (Balance) โดยสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตนั้นมีความต่างเฟสเป็นศูนย์
- 2) สถานะหมุนรอบแกน X โดยกำหนดความเร็วเชิงมุมให้โจโรสโคปหมุนในแนวแกน X
- 3) สถานะหมุนรอบแกน Z โดยกำหนดความเร็วเชิงมุมให้โจโรสโคปหมุนในแนวแกน Z
- 4) สถานะหมุนรอบแกน Y โดยกำหนดความเร็วเชิงมุมให้โจโรสโคปหมุนในแนวแกน Y

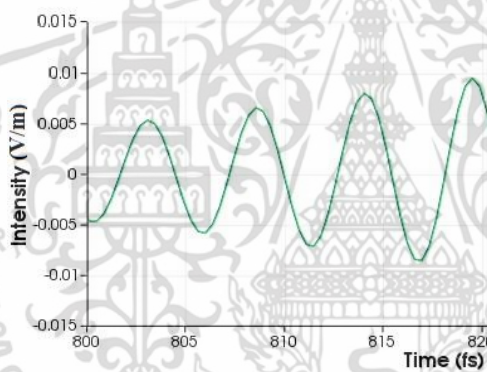
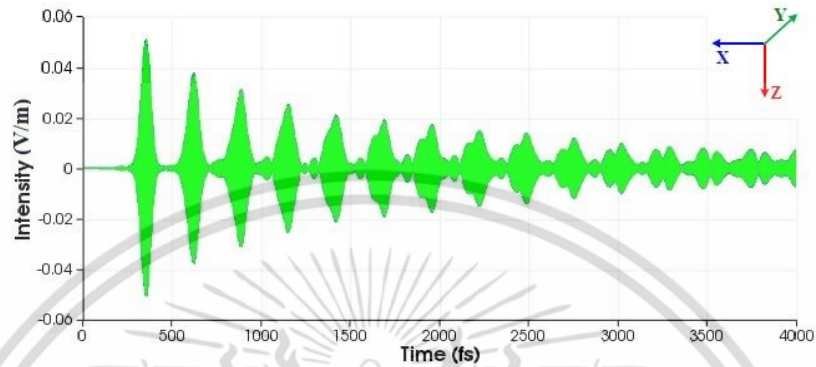
เมื่อสัญญาณที่วัดได้มีเฟสแตกต่างกันจึงมีกระบวนการป้อนกลับสัญญาณเพื่อให้ระบบกลับสู่สถานะสมดุลได้ด้วยการนำสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตไปประมวลผลที่วงจรป้อนกลับดังรูปที่ 3.14



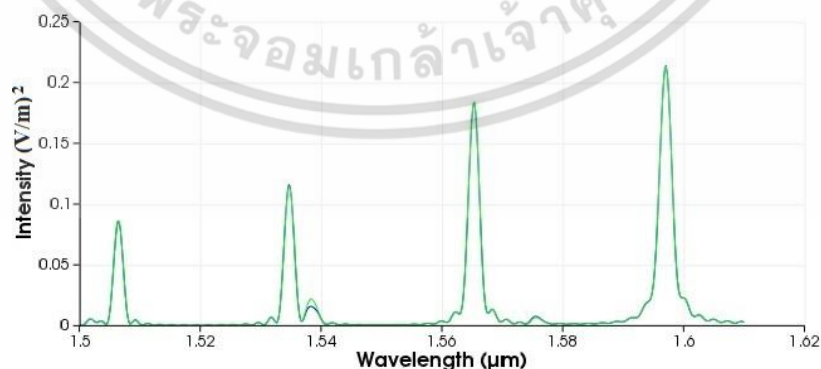
รูปที่ 3.14 วงจรป้อนกลับ (Feedback Control)

โดยแปลงสัญญาณแสงทั้งสองเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วย (ADC) พร้อมกับประมวลผลเป็นสัญญาณคลื่นขั้นบันได (Ladder wave) และมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) เพื่อให้ได้สัญญาณใหม่สำหรับชดเชยความต่างเฟสที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงแปลงสัญญาณเป็นแอนะล็อกด้วย (DAC) และป้อนสัญญาณกลับไปที่อินพุตของวงแหวนสั่นพ้องผ่านตัวมอดูเลตเฟส (PM) เท่านั้นระบบก็จะกลับเข้าสู่สถานะสมดุล โดยผู้วิจัยได้จำลองการทำงานของโจโรสโคปตามสถานะดังกล่าวและได้ผลลัพธ์ดังนี้

สถานะที่หนึ่ง : สมดุล (Balance) สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตเทียบกันในแกนเวลาตามระดับความเข้มของสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.15 และในแกนความยาวคลื่นตามระดับค่านอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณดังรูปที่ 3.16 ซึ่งสังเกตได้ว่าสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตนั้นมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากความต่างเฟสเป็นศูนย์



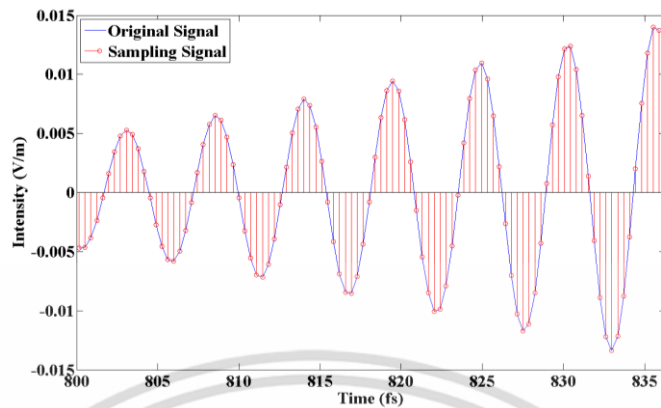
รูปที่ 3.15 ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะสมดุล



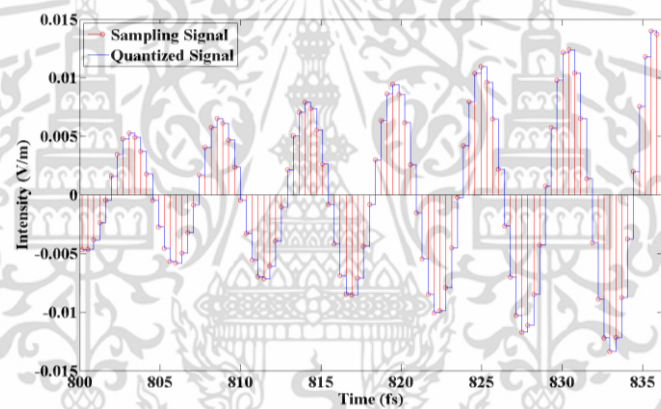
รูปที่ 3.16 ค่านอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

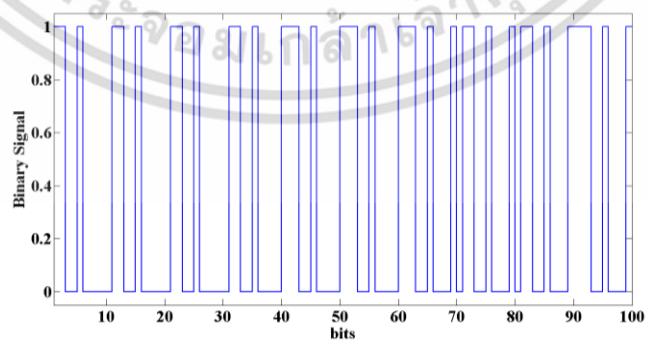
แปลงสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองพอร์ตจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลได้ดังรูปที่ 3.17 ถึง 3.22



รูปที่ 3.17 แซมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

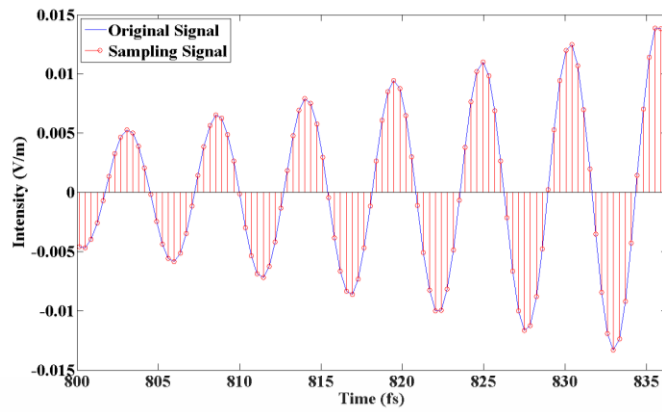


รูปที่ 3.18 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

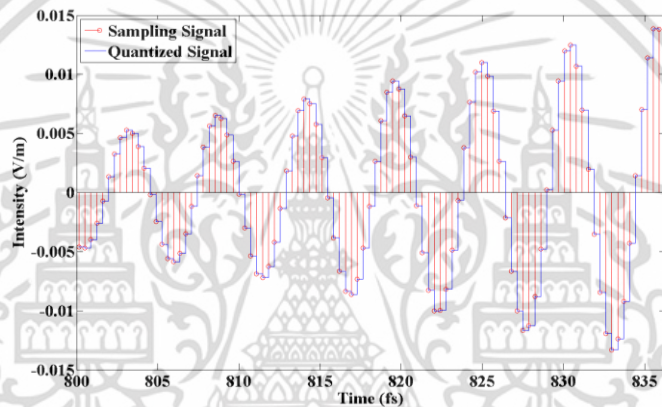


รูปที่ 3.19 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง

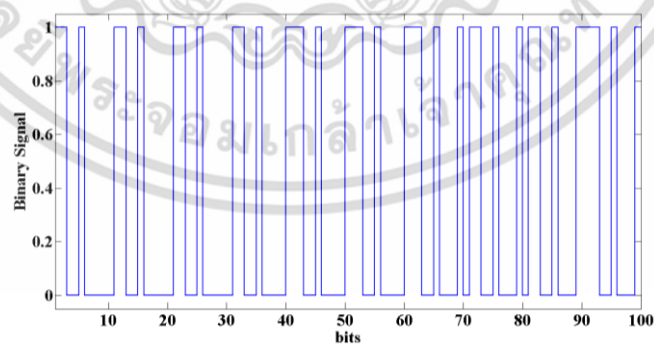
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 แซมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่สอง



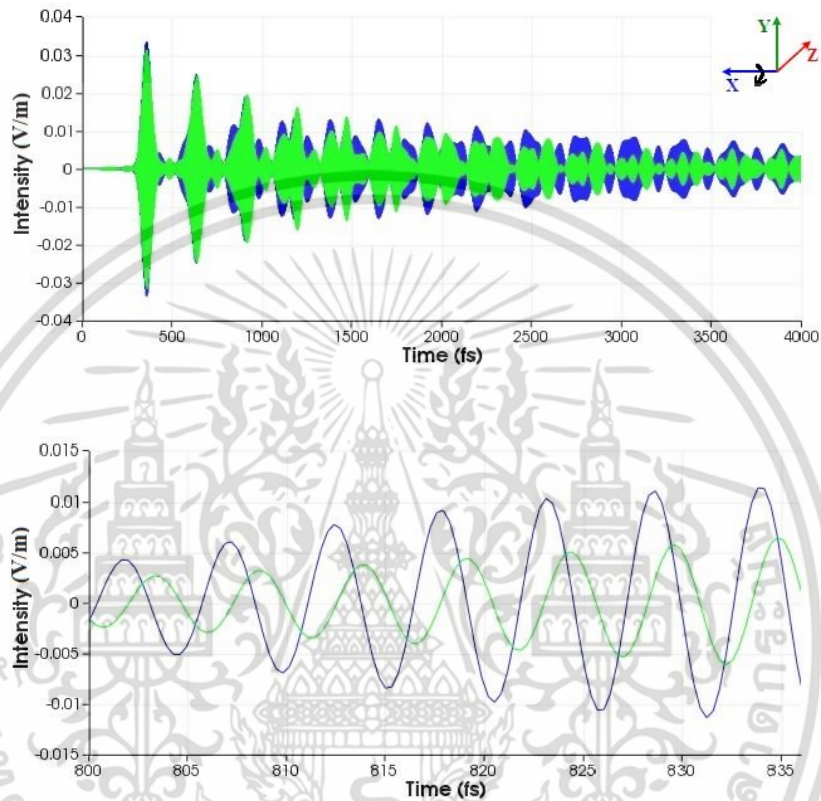
รูปที่ 3.21 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง



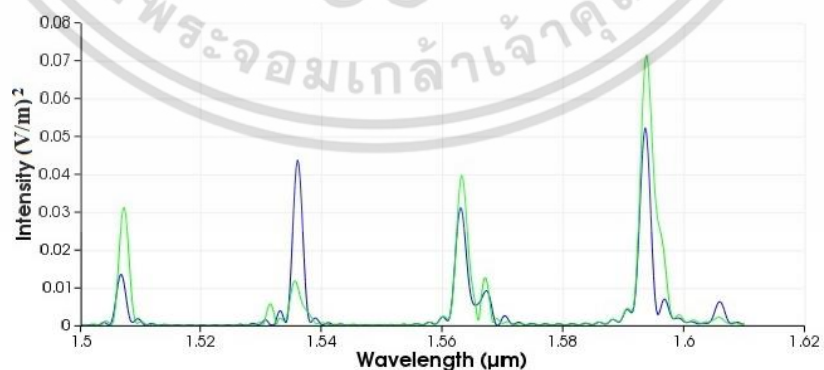
รูปที่ 3.22 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง

สรุปการจำลองผลในสถานะสมดุล เมื่อวัดสัญญาณจากเอาต์พุตทั้งสองเปรียบเทียบกับพบว่าสัญญาณทั้งสองนั้นมีเฟสที่ตรงกัน เนื่องจากการกำหนดมุมหมุน มีเฟสเท่ากับศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะที่สอง : หมุนรอบแกน X โดยกำหนดความเร็วเชิงมุมให้โจโรสโคปหมุนในแนวแกน X สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตเทียบกันในแกนเวลาตามระดับความเข้มของสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.23 และในแกนความยาวคลื่นตามระดับค่านอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณดังรูปที่ 3.24 ซึ่งสังเกตได้ว่าสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตนั้นมีเฟสแตกต่างกัน



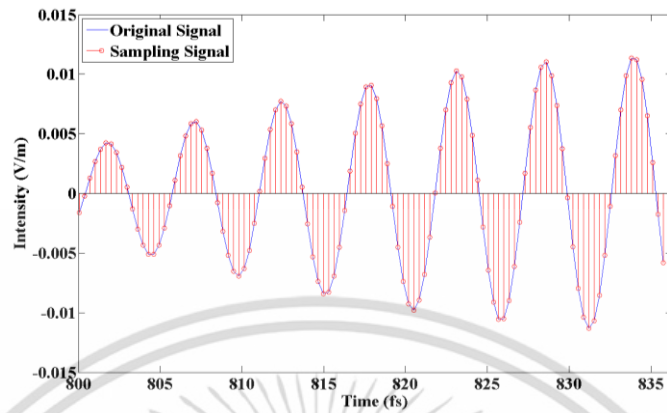
รูปที่ 3.23 ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะหมุนรอบแกน X



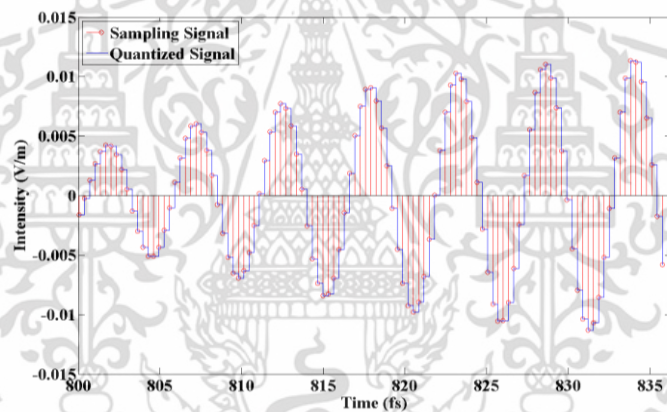
รูปที่ 3.24 ค่านอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

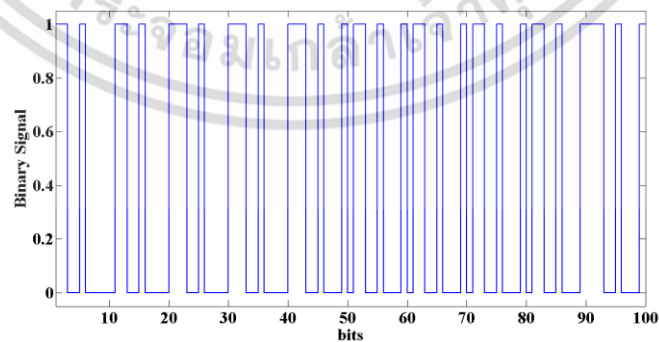
แปลงสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองพอร์ตจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลได้ดังรูปที่ 3.25 ถึง 3.30 โดยมีค่าผิดพลาด (BER) อยู่ที่ 6.40 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.25 แซมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

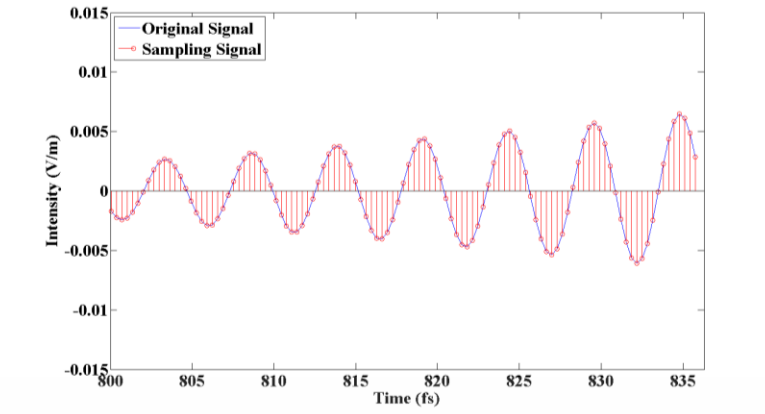


รูปที่ 3.26 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

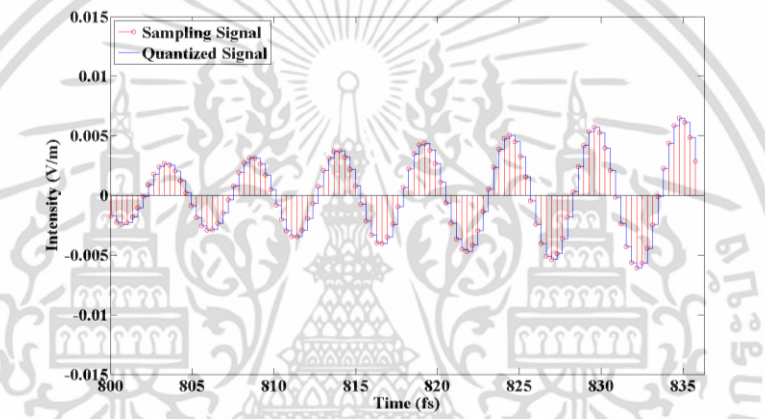


รูปที่ 3.27 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง

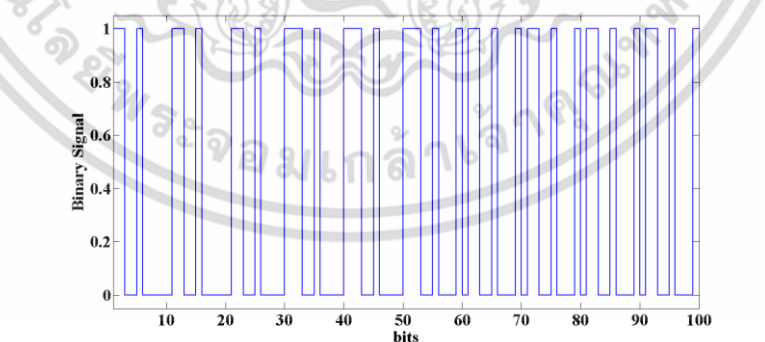
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แซมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่สอง



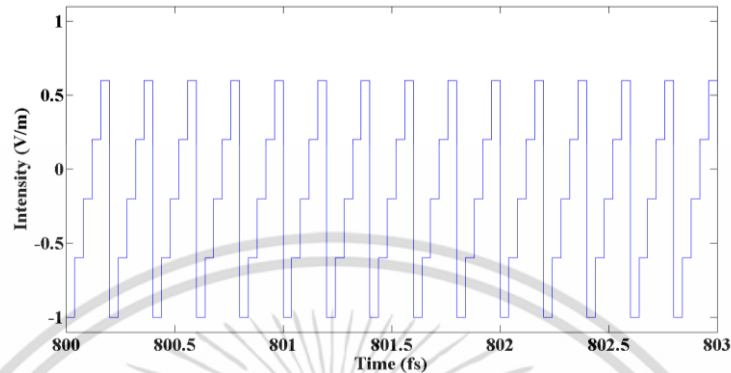
รูปที่ 3.29 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง



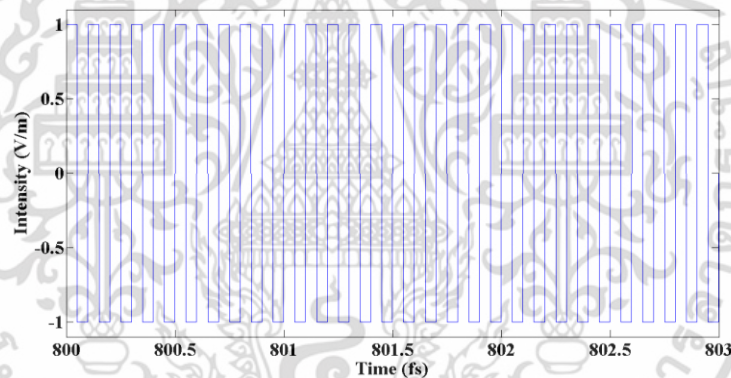
รูปที่ 3.30 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากประมวลผลจะได้สัญญาณคลื่นแบบขั้นบันไดและสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.31 และ 3.32 ตามลำดับ เพื่อมอดูเลตสัญญาณทั้งสองและป้อนกลับไปยังอินพุตของวงแหวนสั่นพ้องแผนด้าทำให้เฟสของสัญญาณเป็นศูนย์และกลับสู่สถานะสมดุล



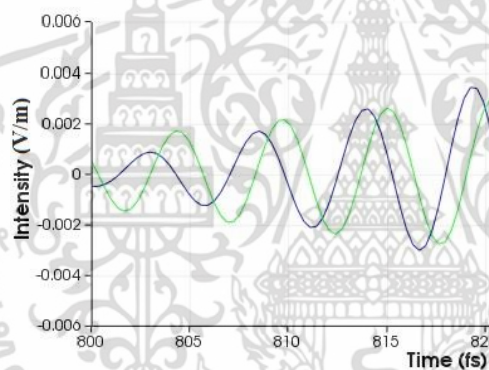
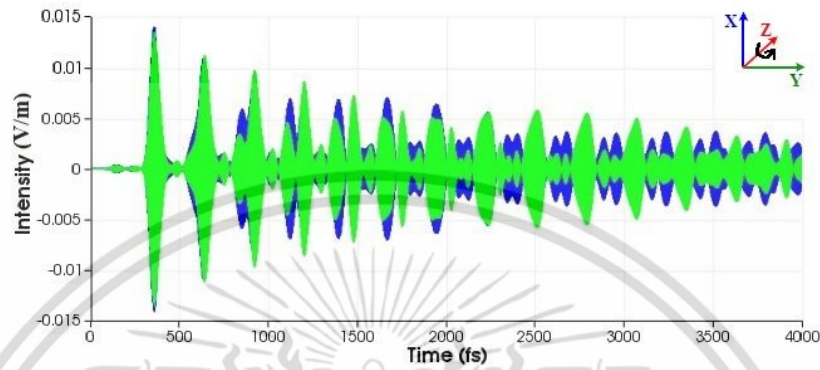
รูปที่ 3.31 สัญญาณคลื่นแบบขั้นบันได



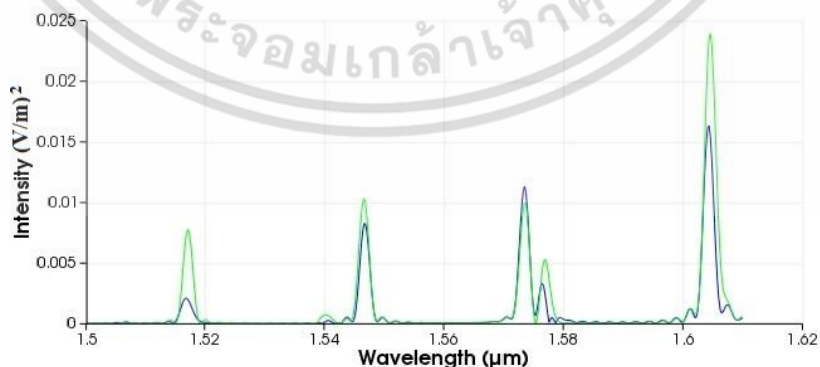
รูปที่ 3.32 สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม

สรุปการจำลองผลสถานะหมุนรอบแกน X เมื่อวัดสัญญาณจากเอาต์พุตทั้งสองเปรียบเทียบกับพบว่าสัญญาณทั้งสองมีเฟสไม่ตรงกัน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเดินทางของแสงทั้งสองต่างกันตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค เมื่อแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถวัดค่าผิดพลาด (BER) ได้เท่ากับ 6.40 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นประมวลสัญญาณเป็นคลื่นขั้นบันไดและมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับสำหรับชดเชยความความต่างเฟสที่เกิดขึ้น

สถานะที่สาม : หมุนรอบแกน Z โดยกำหนดความเร็วเชิงมุมให้โรตอร์โคพหมุนในแนวแกน Z สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตเทียบกันในแกนเวลาตามระดับความเข้มของสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.33 และในแกนความยาวคลื่นตามระดับค่าอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณดังรูปที่ 3.34 ซึ่งสังเกตได้ว่าสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตนั้นมีเฟสแตกต่างกัน



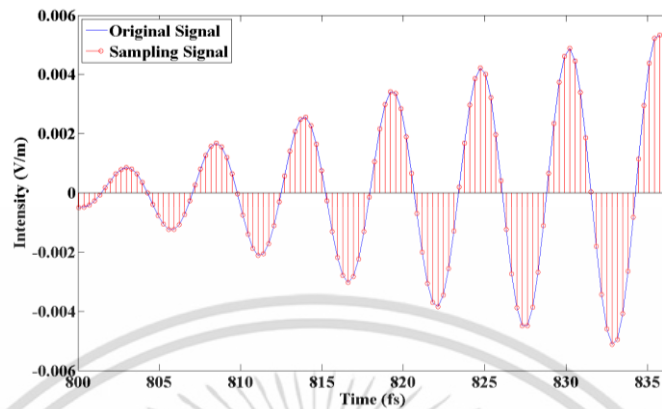
รูปที่ 3.33 ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะหมุนรอบแกน Z



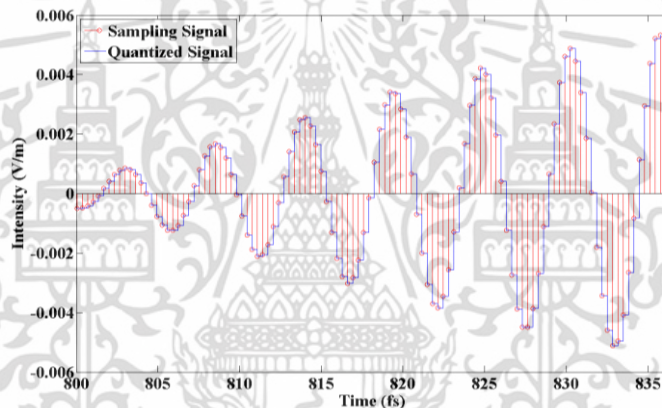
รูปที่ 3.34 ค่าอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

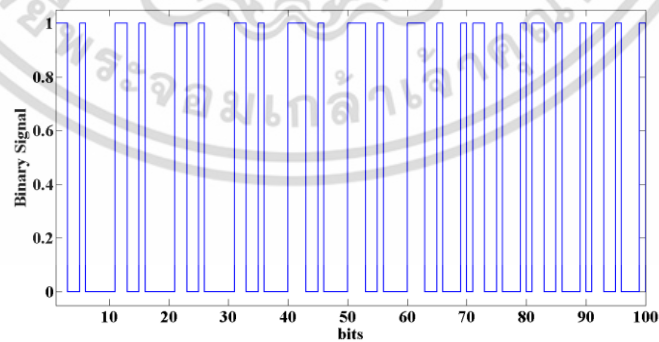
แปลงสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองพอร์ตจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลได้ดังรูปที่ 3.35 ถึง 3.40 โดยมีค่าผิดพลาด (BER) อยู่ที่ 6.67 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.35 แซมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

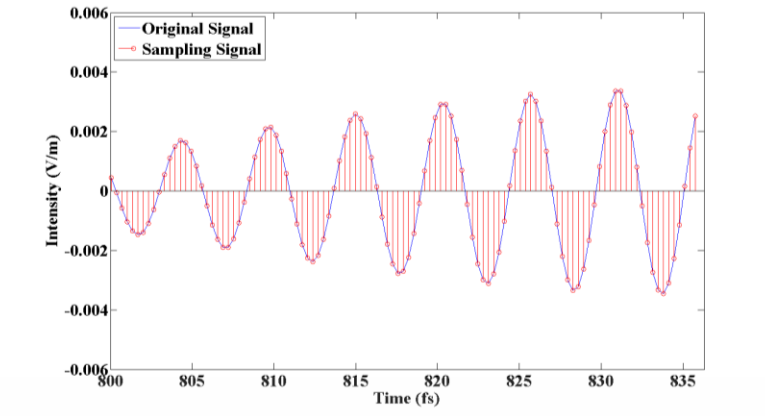


รูปที่ 3.36 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

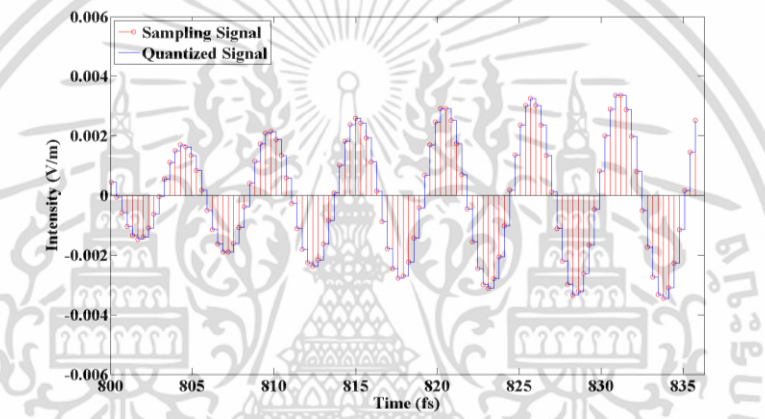


รูปที่ 3.37 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง

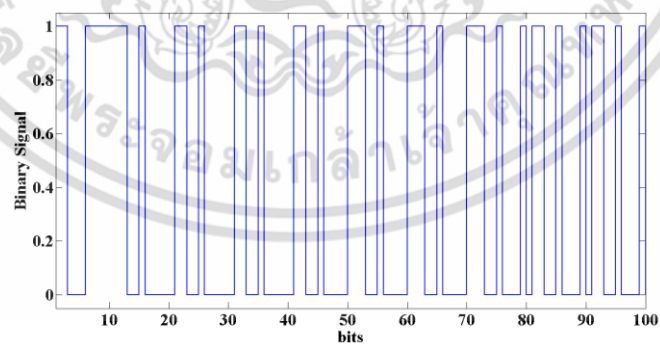
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 แซมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่สอง



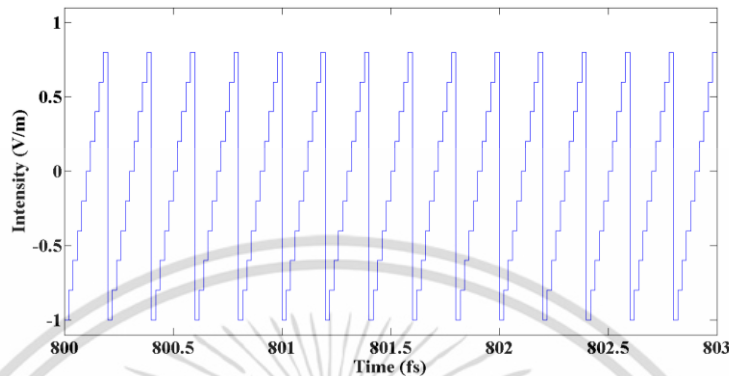
รูปที่ 3.39 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง



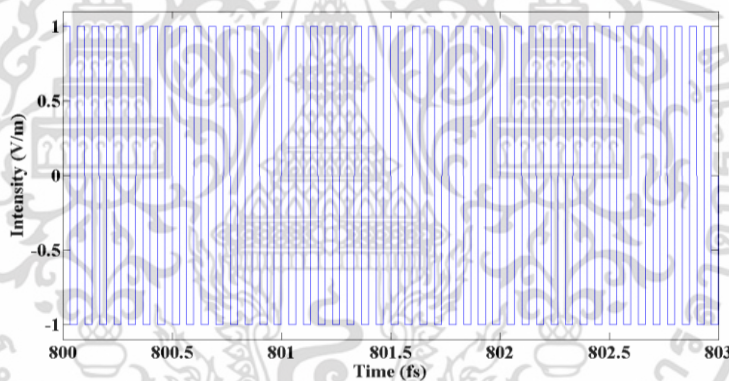
รูปที่ 3.40 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากประมวลผลจะได้สัญญาณคลื่นแบบขั้นบันไดและสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.41 และ 3.42 ตามลำดับ เพื่อมอดูเลตสัญญาณทั้งสองและป้อนกลับไปยังอินพุตของวงแหวนสั่นพ้องแพนด้าทำให้เฟสของสัญญาณเป็นศูนย์และกลับสู่สถานะสมดุล



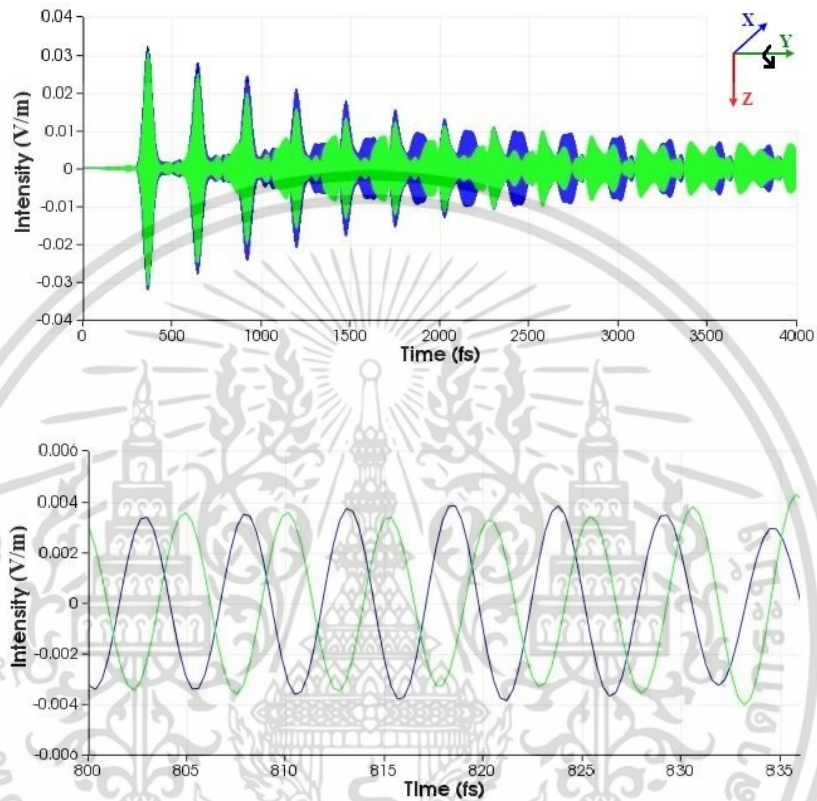
รูปที่ 3.41 สัญญาณคลื่นแบบขั้นบันได



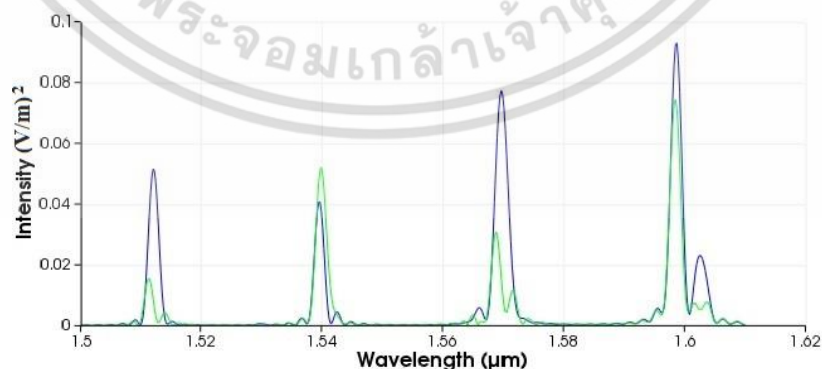
รูปที่ 3.42 สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม

สรุปการจำลองผลสถานะหมุนรอบแกน Z เมื่อวัดสัญญาณจากเอาต์พุตทั้งสองเปรียบเทียบกับพบว่าสัญญาณทั้งสองมีเฟสไม่ตรงกัน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเดินทางของแสงทั้งสองต่างกันตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค เมื่อแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถวัดค่าผิดพลาด (BER) ได้เท่ากับ 6.67 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นประมวลสัญญาณเป็นคลื่นขั้นบันไดและมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับสำหรับชดเชยความความต่างเฟสที่เกิดขึ้น

สถานะที่สี่ : หมุนรอบแกน Y โดยกำหนดความเร็วเชิงมุมให้โจโรสโคปหมุนในแนวแกน Y สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตเทียบกันในแกนเวลาตามระดับความเข้มของสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.43 และในแกนความยาวคลื่นตามระดับค่าอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณดังรูปที่ 3.44 ซึ่งสังเกตได้ว่าสัญญาณที่เอาต์พุตทั้งสองพอร์ตนั้นมีเฟสแตกต่างกัน



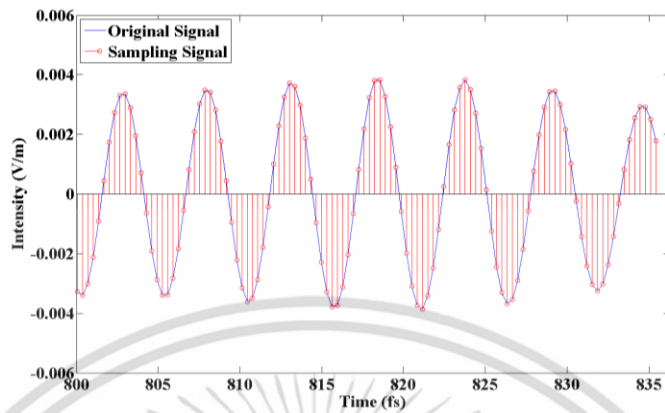
รูปที่ 3.43 ผลลัพธ์จากสัญญาณที่เอาต์พุตหนึ่งและเอาต์พุตสองที่สถานะหมุนรอบแกน Y



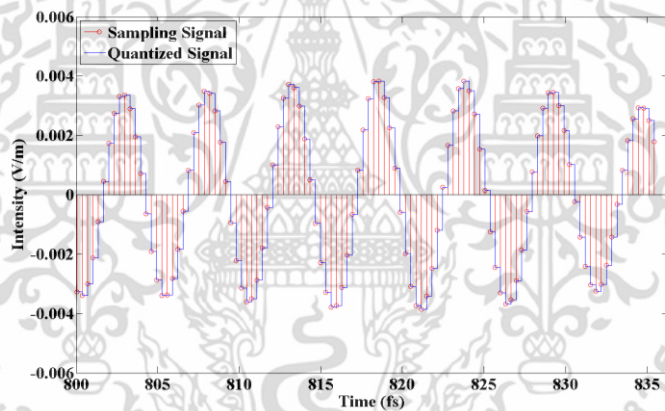
รูปที่ 3.44 ค่าอมัลไลซ์ความเข้มของสัญญาณระหว่างเอาต์พุตที่หนึ่งและสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

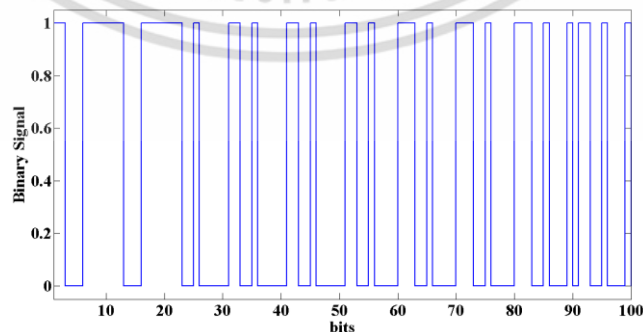
แปลงสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองพอร์ตจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลได้ดังรูปที่ 3.45 ถึง 3.50 โดยมีค่าผิดพลาด (BER) อยู่ที่ 6.64 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.45 แซมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

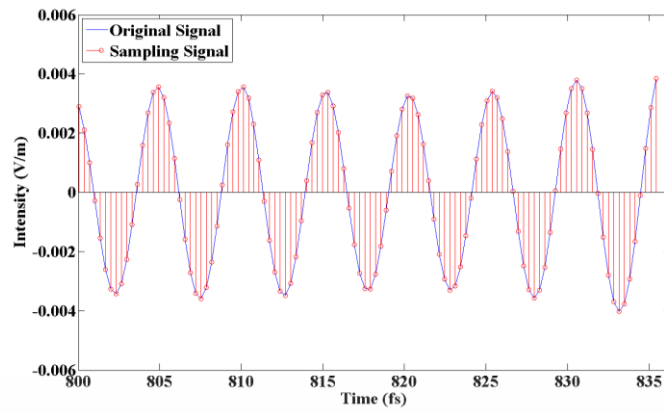


รูปที่ 3.46 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่หนึ่ง

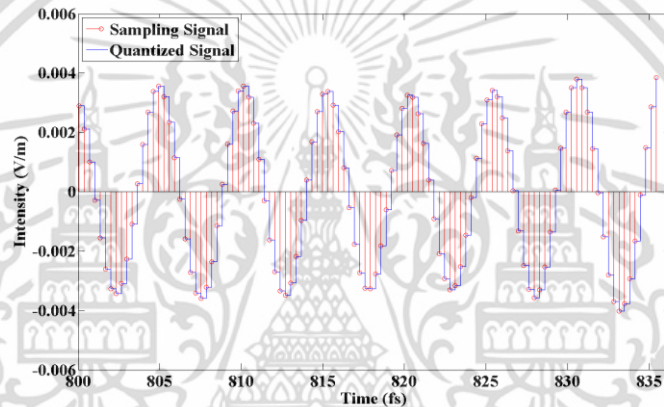


รูปที่ 3.47 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่หนึ่ง

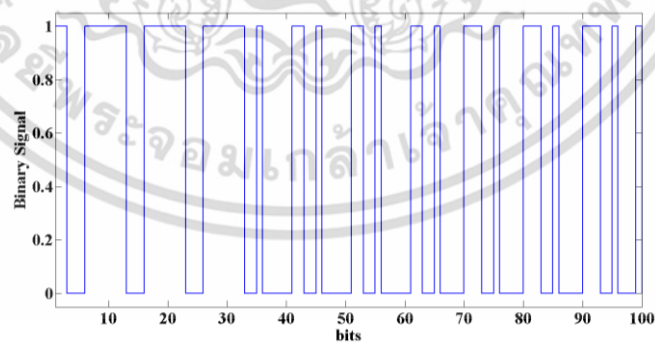
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.48 แชมปลิงสัญญาณเอาต์พุตที่สอง



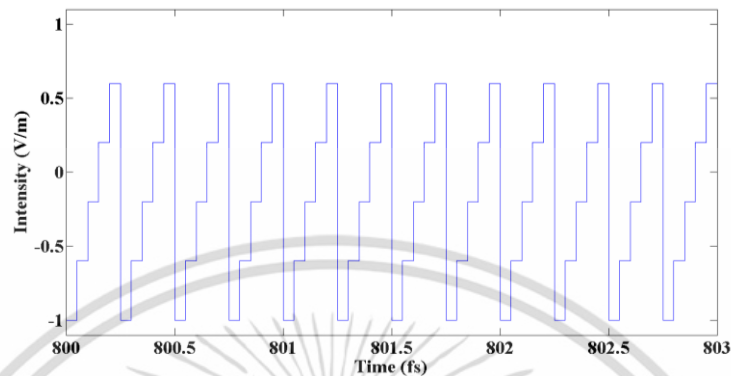
รูปที่ 3.49 ควอนไทซ์สัญญาณเอาต์พุตที่สอง



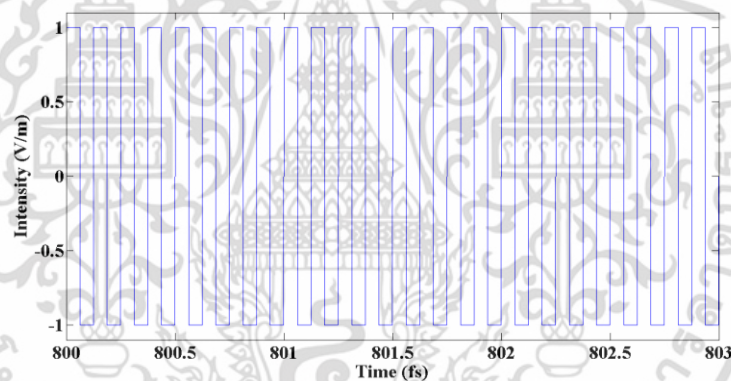
รูปที่ 3.50 สัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จากเอาต์พุตที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากประมวลผลจะได้สัญญาณคลื่นแบบขั้นบันไดและสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.51 และ 3.52 ตามลำดับ เพื่อมอดูเลตสัญญาณทั้งสองและป้อนกลับไปยังอินพุตของวงแหวนสั่นพ้องแพนด้าทำให้เฟสของสัญญาณเป็นศูนย์และกลับสู่สถานะสมดุล



รูปที่ 3.51 สัญญาณคลื่นแบบขั้นบันได



รูปที่ 3.52 สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม

สรุปการจำลองผลสถานะหมุนรอบแกน Y เมื่อวัดสัญญาณจากเอาต์พุตทั้งสองเปรียบเทียบกับกันพบว่าสัญญาณทั้งสองมีเฟสไม่ตรงกัน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเดินทางของแสงทั้งสองต่างกันตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็ค เมื่อแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลสามารถวัดค่าผิดพลาด (BER) ได้เท่ากับ 6.64 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นประมวลสัญญาณเป็นคลื่นขั้นบันไดและมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับสำหรับชดเชยความความต่างเฟสที่เกิดขึ้น

3.5 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้นำเสนอเซนเซอร์ไจโรเชิงแสงขนาดไมโครโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้า สำหรับตรวจวัดทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือทำให้วัตถุนั้นอยู่ในตำแหน่งสมดุได้ โดยวิเคราะห์โครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องแพนด้าจากสมการคณิตศาสตร์และจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม 3D FDTD จำลองการหมุนแบบลำดับตามหลักของออยเลอร์ โดยหมุนทีละแกนในระบบพิกัดสามมิติจนครบทั้งสามแกนได้แก่มุมโรล (roll) มุมพิตช์ (pitch) และมุมยอ (yaw) โดยที่มุมโรลถูกกำหนดให้เป็นมุมของการหมุนรอบแกน (X) ในขณะที่มุมพิตช์ถูกกำหนดให้เป็นมุมของการหมุนรอบแกน (Y) และมุมยอถูกกำหนดให้เป็นมุมของการหมุนรอบแกน (Z) สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ทั้งสองข้างจะมีความต่างเฟสตามปรากฏการณ์ของแซ็กแนคเนื่องจากวัตถุมีการหมุนหรือเคลื่อนที่สามารถวัดการเลื่อนของเฟสได้ตามที่กำหนดมุมหมุนในแต่ละแกน จากนั้นจึงนำสัญญาณมาประมวลผลโดยใช้วงจรป้อนกลับเพื่อสร้างสัญญาณชดเชยให้ไจโรสโคปกลับมาอยู่ในตำแหน่งที่สมดุ

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการคับปลิงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 ปรากฏว่าค่า 0.9 ให้ผลดีที่สุดคือ ค่ากำลังเอาต์พุตเท่ากับ 1.75 มิลลิวัตต์ ค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ได้เท่ากับ 0.0036 องศาต่อชั่วโมง ซึ่งถือว่ามีความไวที่สูง วัดค่าความกว้างของพัลส์ (FWHM) ได้เท่ากับ 271 กิโลเฮิรตซ์ ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) เท่ากับ 19.2 นาโนเมตร ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 1185 ค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) เท่ากับ 8.33 ppm ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเชิงมุม (Angle Random Walk: ARW) เท่ากับ 0.0015 องศาต่อรากที่สองของชั่วโมง

บทที่ 4

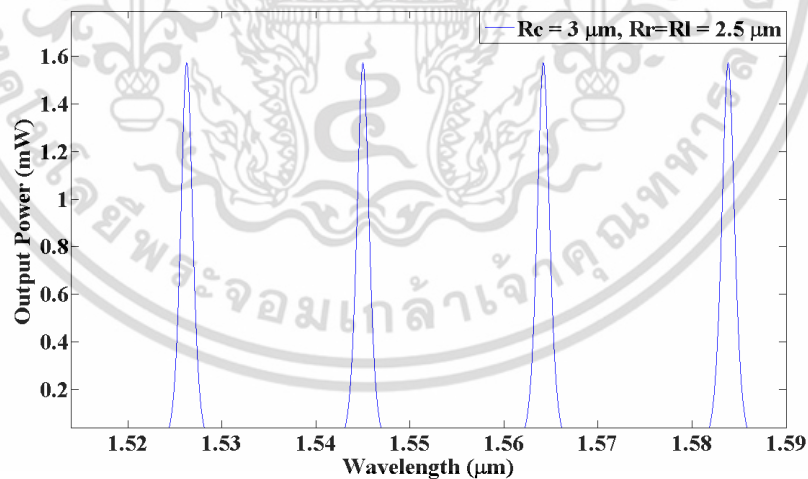
วิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบที่ได้นำเสนอขึ้นประกอบไปด้วยขนาดของวงแหวนสั่นพ้อง ความยาวคลื่นของสัญญาณ และค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง จากนั้นจึงจำลองผลเอาต์พุตของโจโรสโคปเพื่อวัดค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ความกว้างของพัลส์ (FWHM) ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) และค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) โดยใช้โปรแกรม MATLAB สุดท้ายจึงเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ

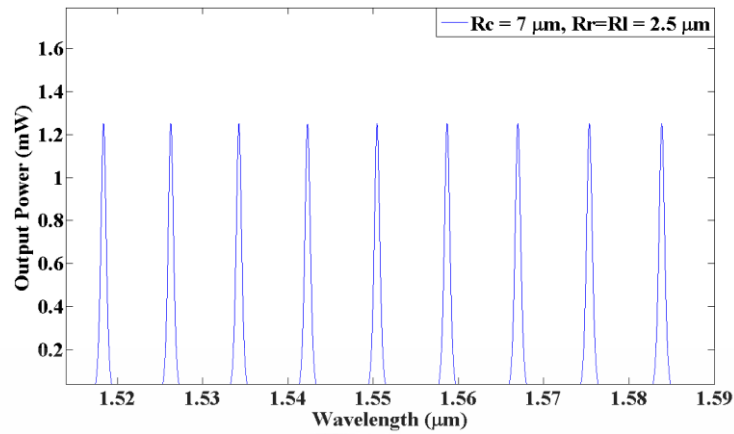
4.1.1 ขนาดของวงแหวนสั่นพ้อง สามารถแยกพิจารณาได้ 4 กรณีดังนี้

4.1.1.1 กำหนดค่ารัศมีของวงแหวนกลาง (R_c) ระหว่าง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร และรัศมีของวงแหวนด้านข้างซ้าย (R_l) กับขวา (R_r) เท่ากับ 2.5 ไมโครเมตร สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตได้ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 และวัดค่า Sensitivity, FSR, FWHM และ Q ตามช่วงขนาดของรัศมีวงแหวนกลาง ได้ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 ตามลำดับ

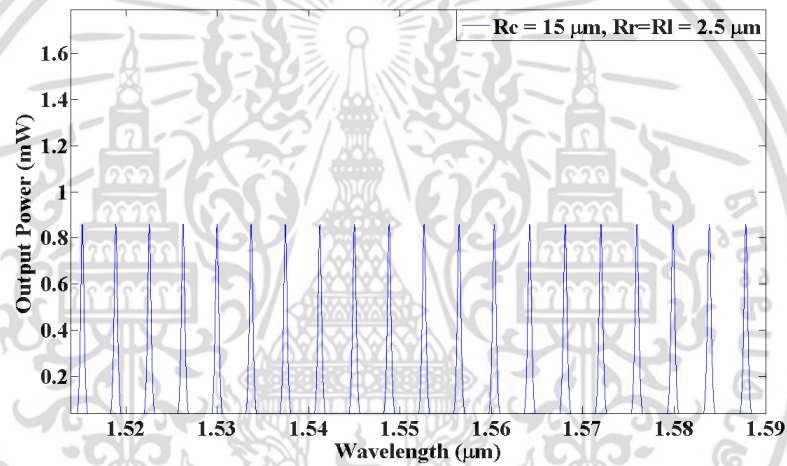


รูปที่ 4.1 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 3 ไมโครเมตร

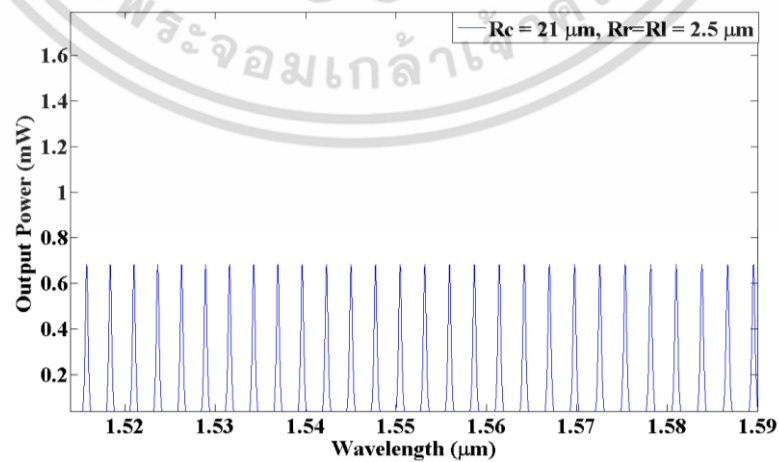
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 7 ไมโครเมตร

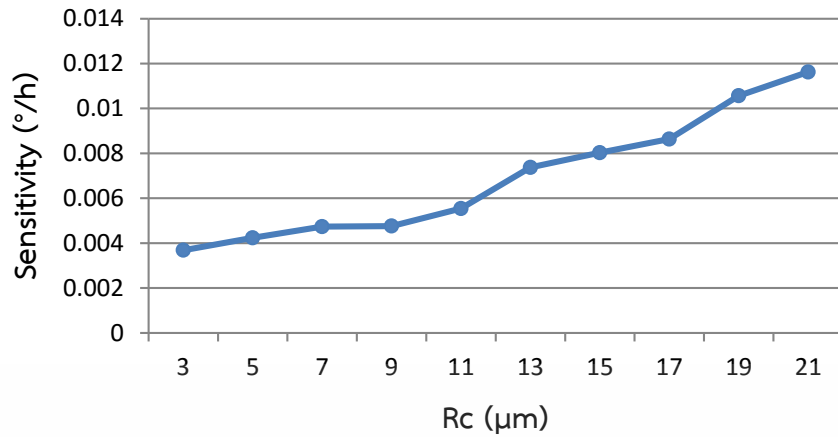


รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 15 ไมโครเมตร

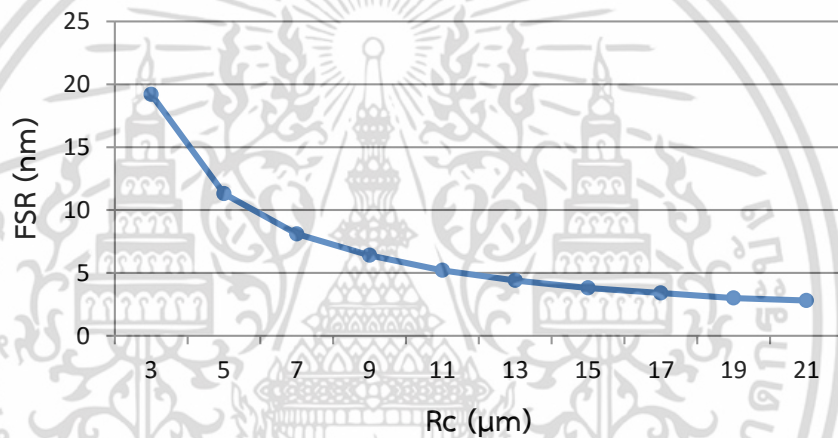


รูปที่ 4.4 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_c เท่ากับ 21 ไมโครเมตร

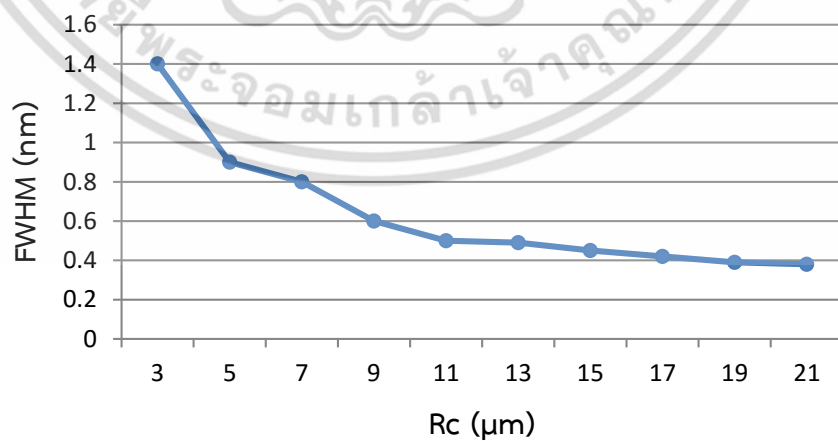
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร

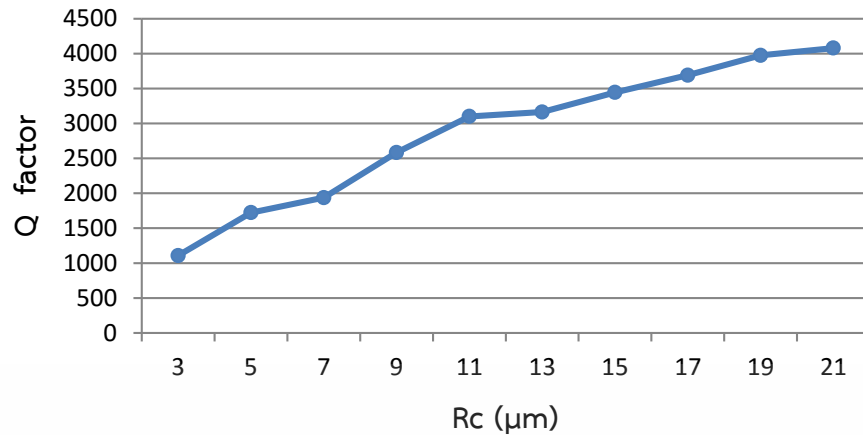


รูปที่ 4.6 ค่า FSR ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.7 ค่า FWHM ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร

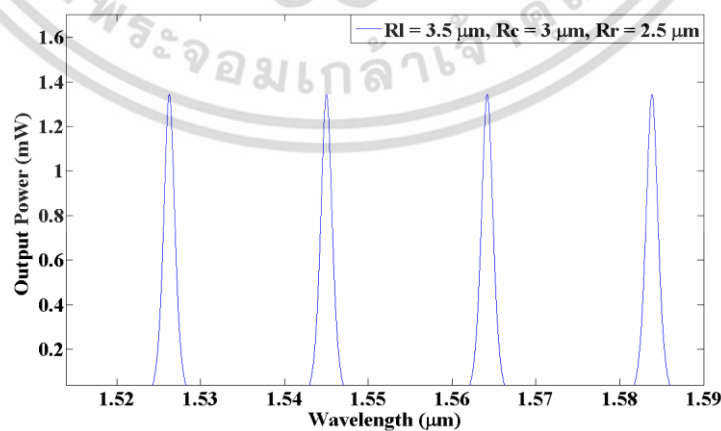
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่า Q ตามรัศมี R_c ในช่วง 3 ถึง 21 ไมโครเมตร

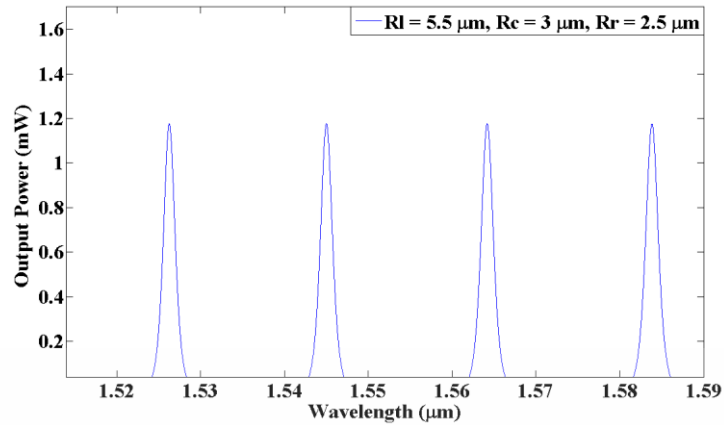
สรุปผลของการเปลี่ยนแปลงรัศมีวงแหวนกลางเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่เอาต์พุตพบว่า เมื่อรัศมีมีค่ามากขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตลดลง ค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) และความกว้างของพัลส์ (FWHM) มีค่าลดลง ส่วนตัวประกอบคุณภาพ (Q) มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถวัดค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดคือ 0.0036 องศาต่อชั่วโมง ค่า FSR เท่ากับ 19 นาโนเมตร FWHM เท่ากับ 1.4 นาโนเมตร และค่า Q เท่ากับ 1185

4.1.1.2 กำหนดรัศมีของวงแหวนกลาง (R_c) 3 ไมโครเมตร รัศมีของวงแหวนด้านข้างซ้าย (R_l) ระหว่าง 3.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร และด้านขวา (R_r) เท่ากับ 2.5 ไมโครเมตร สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตได้ดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.12 และวัดค่า Sensitivity, FSR, FWHM และ Q ตามขนาดของรัศมีวงแหวนด้านข้างซ้ายได้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.16 ตามลำดับ

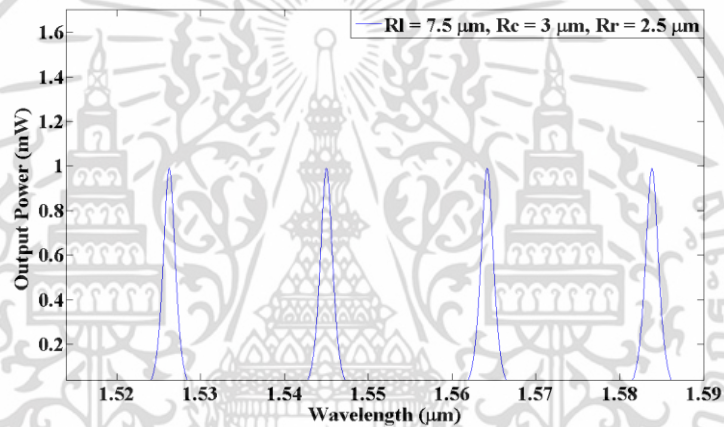


รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร

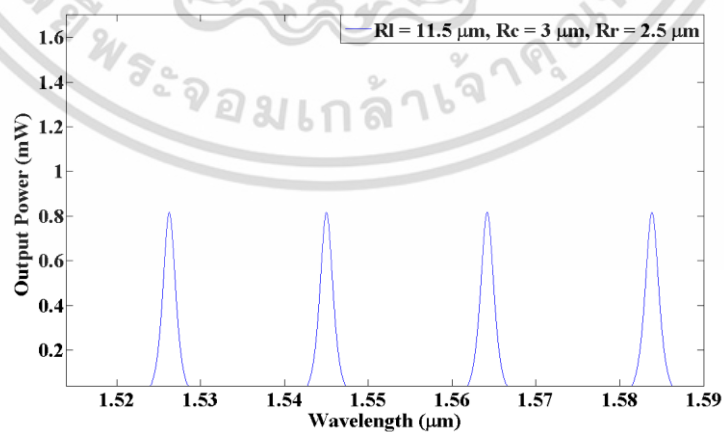
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 5.5 ไมโครเมตร

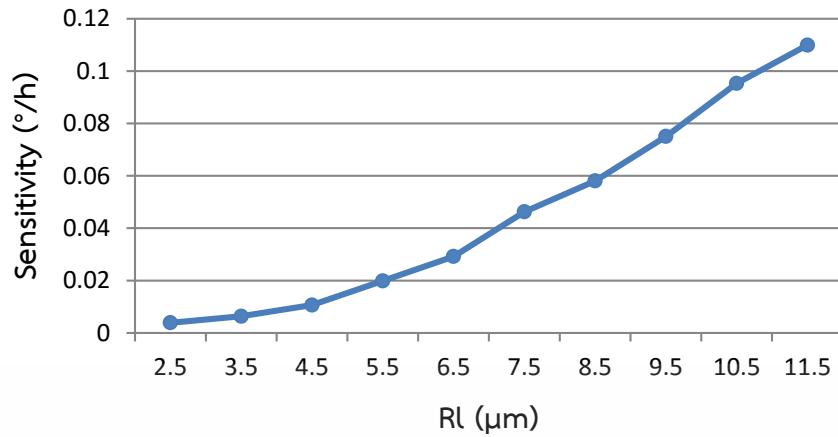


รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 7.5 ไมโครเมตร

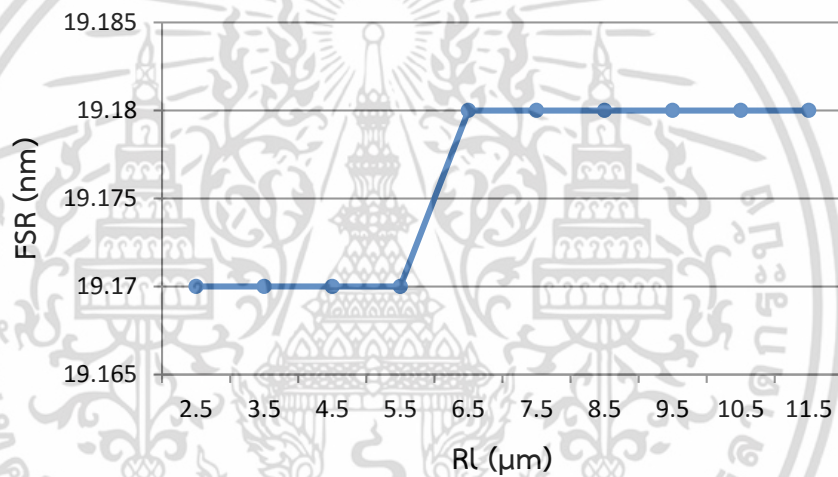


รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_l เท่ากับ 11.5 ไมโครเมตร

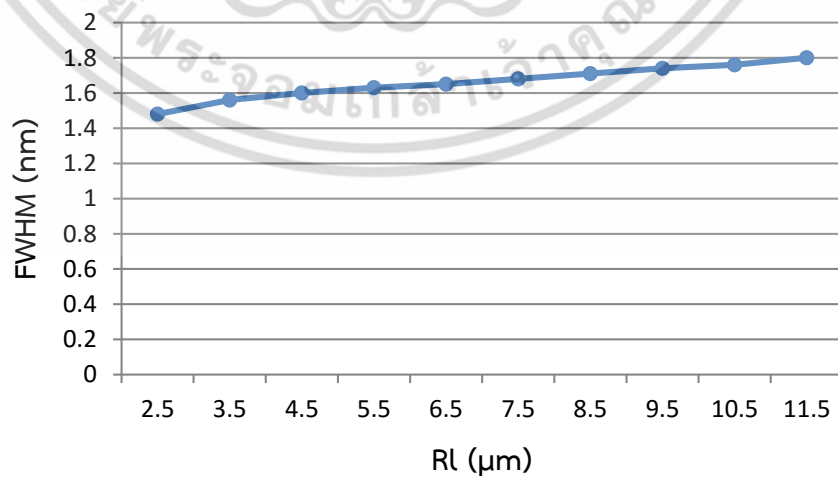
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

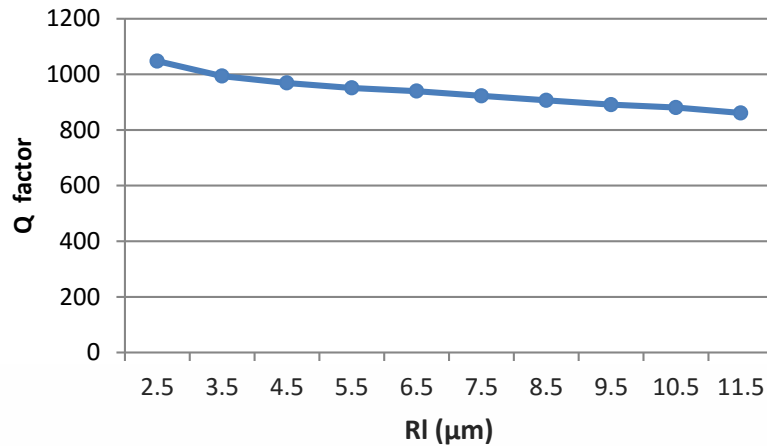


รูปที่ 4.14 ค่า FSR ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.15 ค่า FWHM ตามรัศมี R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

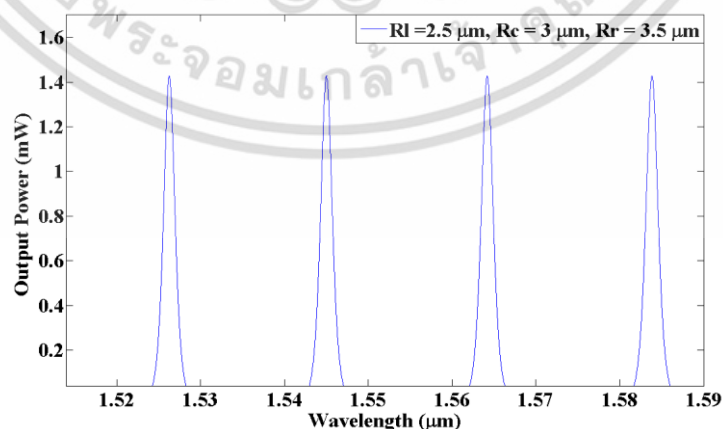
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ค่า Q ตามรัศมี R_i ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

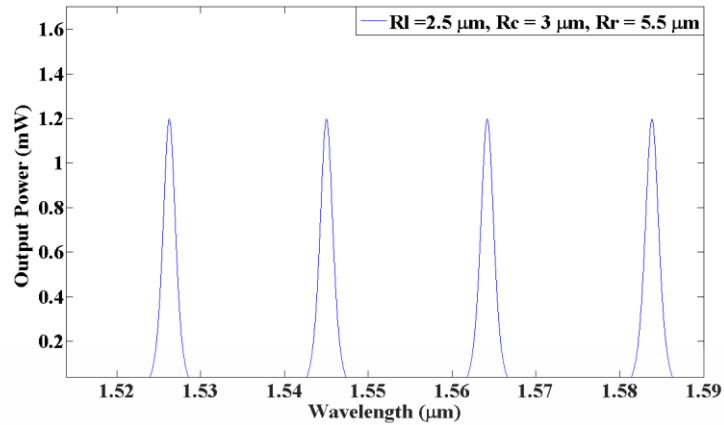
สรุปผลของการเปลี่ยนแปลงรัศมีวงแหวนด้านข้างซ้ายเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่เอาต์พุตพบว่าเมื่อรัศมีมีค่ามากขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตลดลง ค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) และความกว้างของพัลส์ (FWHM) มีค่าลดลง ส่วนตัวประกอบคุณภาพ (Q) มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถวัดค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดคือ 0.0039 องศาต่อชั่วโมง ค่า FSR เท่ากับ 19 นาโนเมตร FWHM เท่ากับ 1.48 นาโนเมตร และค่า Q เท่ากับ 1047

4.1.1.3 กำหนดค่ารัศมีของวงแหวนกลาง (R_c) 3 ไมโครเมตร รัศมีของวงแหวนด้านข้างซ้าย (R_l) เท่ากับ 2.5 ไมโครเมตร และรัศมีของวงแหวนด้านขวา (R_r) ระหว่าง 3.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตได้ดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.20 และวัดค่า Sensitivity, FSR, FWHM และ Q ตามขนาดของรัศมีวงแหวนด้านข้างซ้ายได้ดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.24 ตามลำดับ

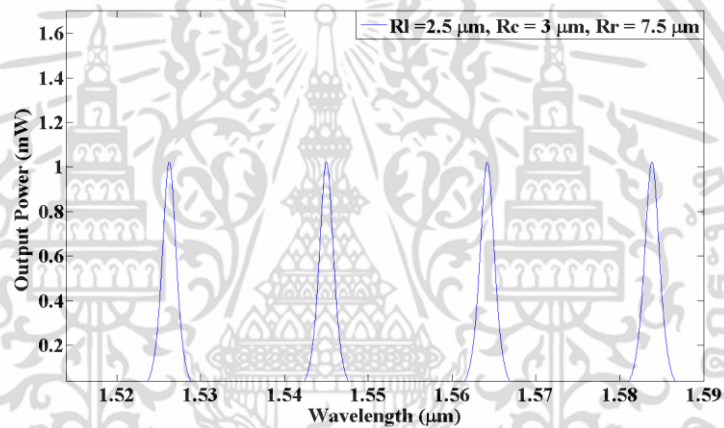


รูปที่ 4.17 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร

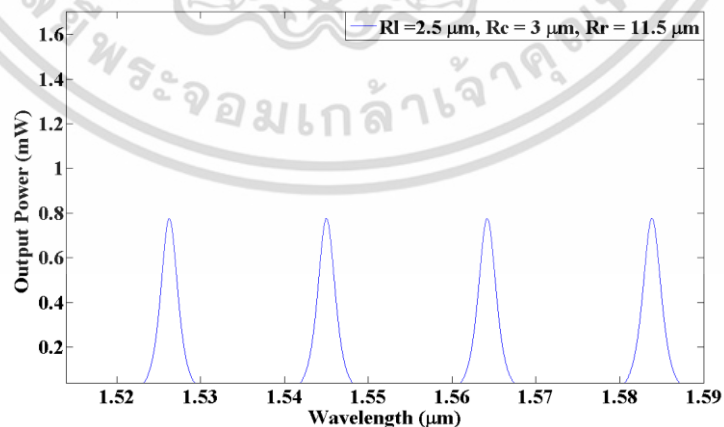
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r เท่ากับ 5.5 ไมโครเมตร

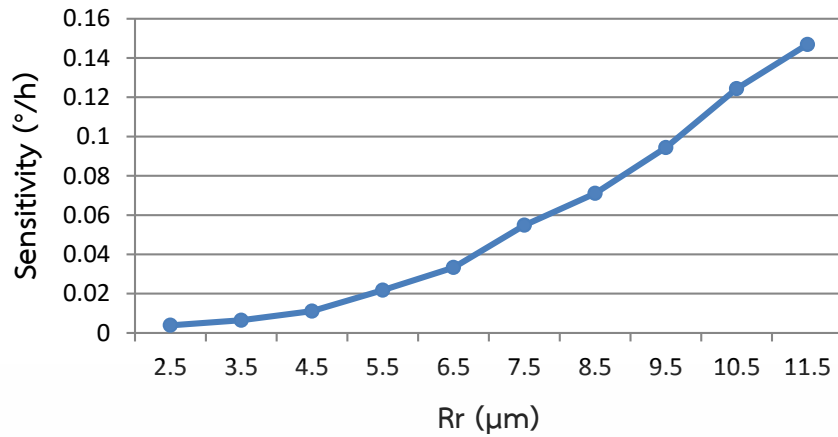


รูปที่ 4.19 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r เท่ากับ 7.5 ไมโครเมตร

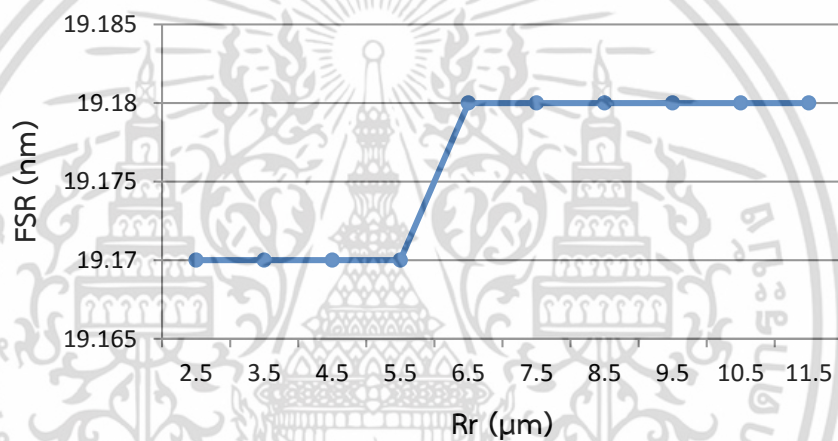


รูปที่ 4.20 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r เท่ากับ 11.5 ไมโครเมตร

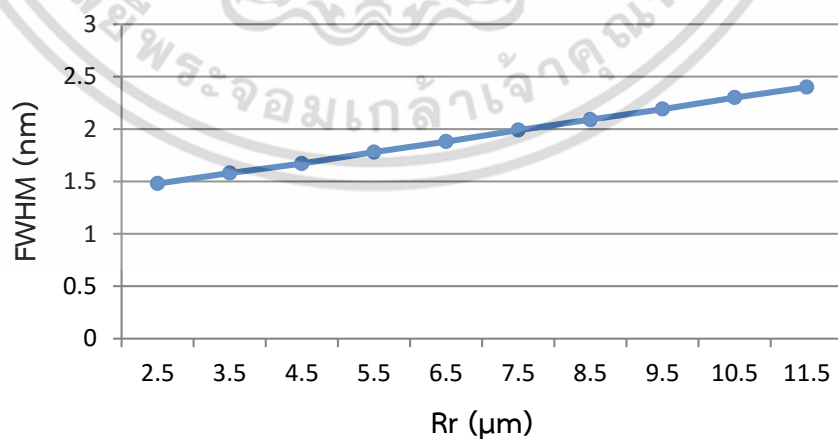
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_r ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

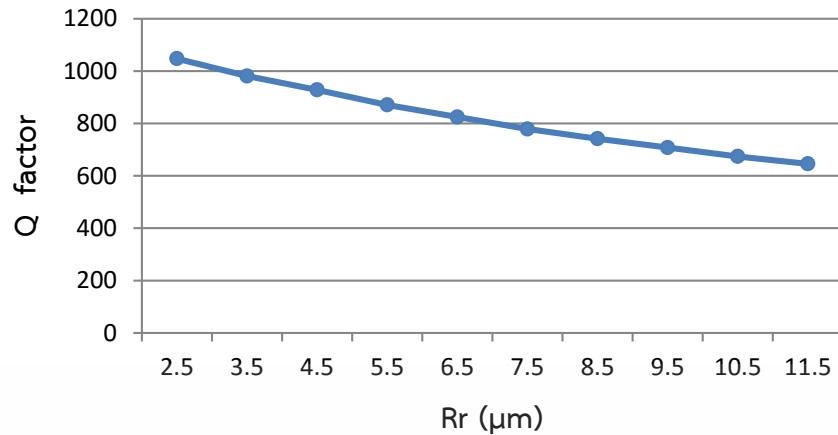


รูปที่ 4.22 ค่า FSR ตามรัศมี R_r ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.23 ค่า FWHM ตามรัศมี R_r ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

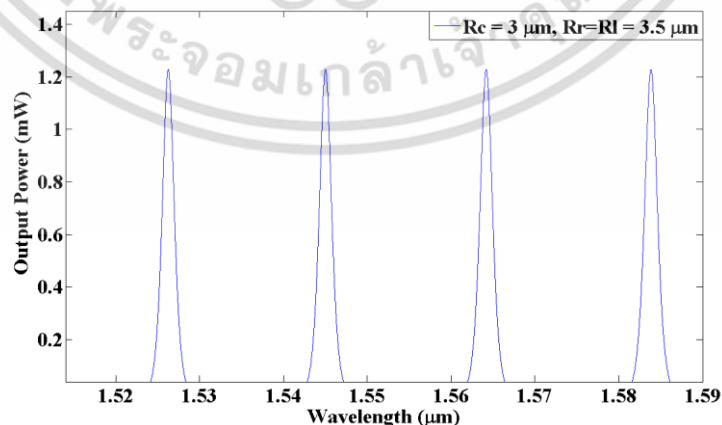
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ค่า Q ตามรัศมี R_r ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

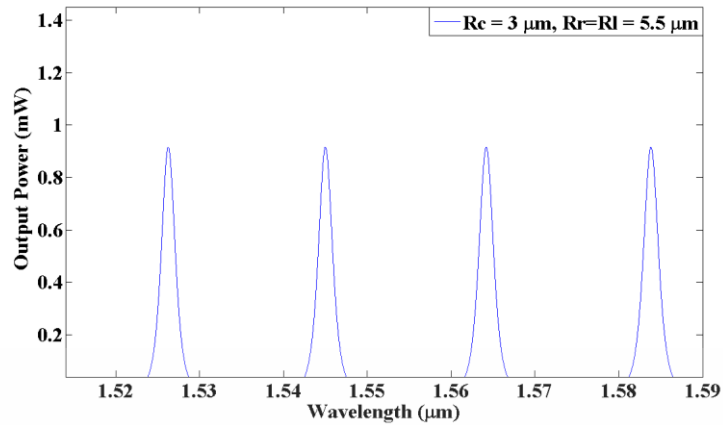
สรุปผลของการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีวงแหวนด้านข้างขวาเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่เอาต์พุตพบว่า เมื่อรัศมีมีค่ามากขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตลดลง ค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) และความกว้างของพัลส์ (FWHM) มีค่าลดลง ส่วนตัวประกอบคุณภาพ (Q) มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถวัดค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดคือ 0.0039 องศาต่อชั่วโมง ค่า FSR เท่ากับ 19 นาโนเมตร FWHM เท่ากับ 1.48 นาโนเมตร และค่า Q เท่ากับ 1047

4.1.1.4 กำหนดค่ารัศมีของวงแหวนกลาง (R_c) 3 ไมโครเมตร รัศมีของวงแหวนด้านข้างซ้าย (R_l) และด้านขวา (R_r) ระหว่าง 3.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร สามารถวัดสัญญาณที่เอาต์พุตได้ดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.28 และวัดค่า Sensitivity, FSR, FWHM และ Q ตามขนาดของรัศมีวงแหวนด้านข้างซ้ายได้ดังรูปที่ 4.29 ถึง 4.32 ตามลำดับ

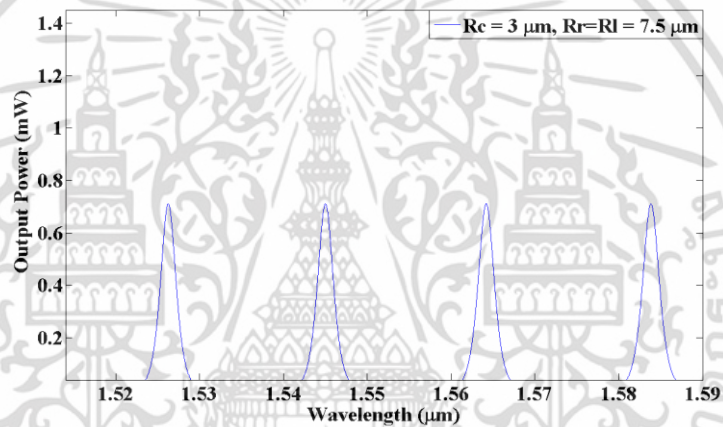


รูปที่ 4.25 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 3.5 ไมโครเมตร

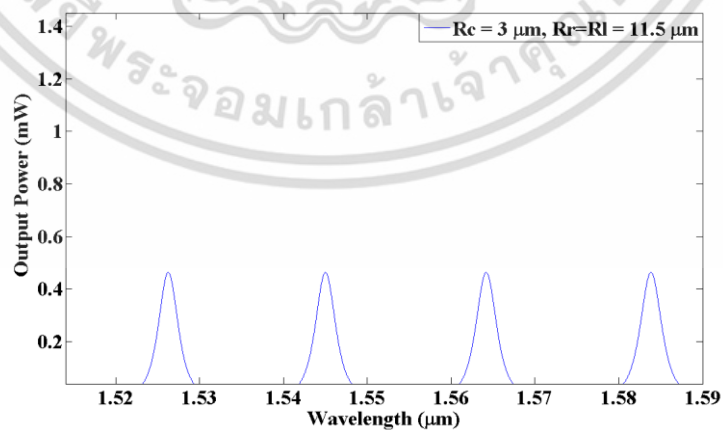
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 5.5 ไมโครเมตร

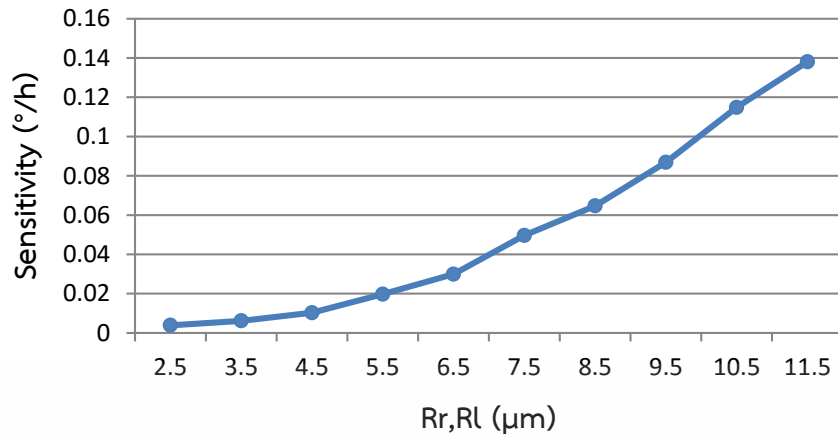


รูปที่ 4.27 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 7.5 ไมโครเมตร

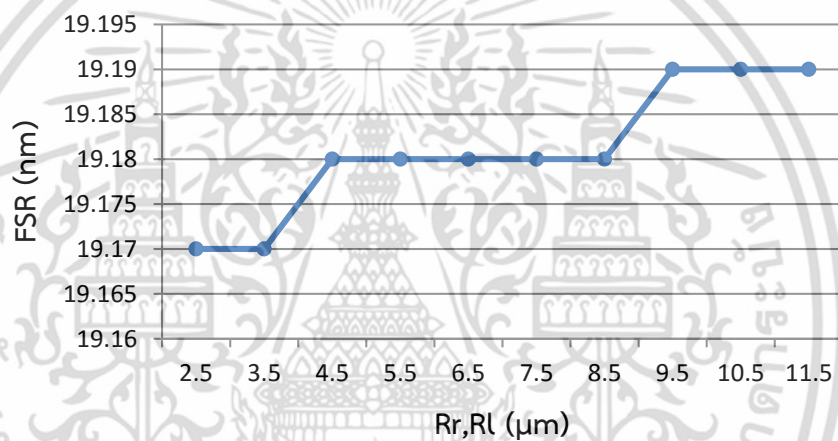


รูปที่ 4.28 สัญญาณเอาต์พุตของรัศมี R_r และ R_l เท่ากับ 11.5 ไมโครเมตร

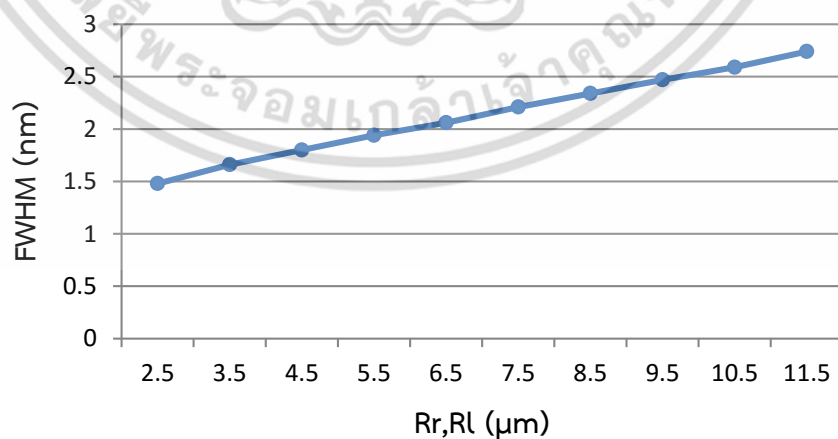
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ค่า Sensitivity ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

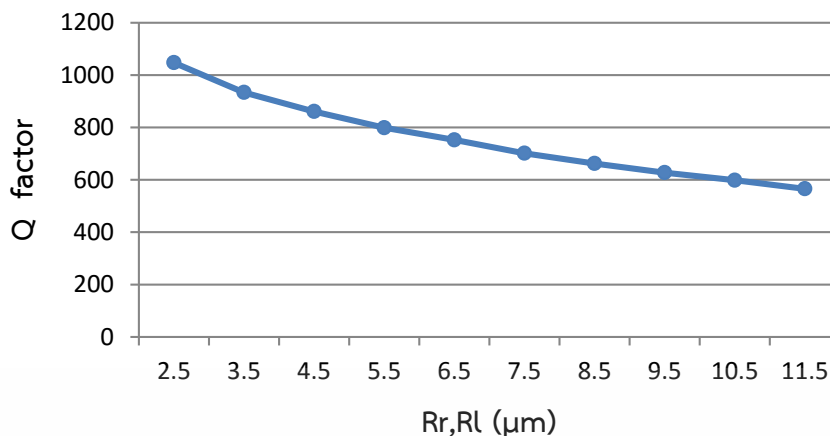


รูปที่ 4.30 ค่า FSR ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.31 ค่า FWHM ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ค่า Q ตามรัศมี R_r และ R_l ในช่วง 2.5 ถึง 11.5 ไมโครเมตร

สรุปผลของการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีวงแหวนด้านข้างซ้ายและขวาเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่เอาต์พุตพบว่า เมื่อรัศมีมีค่ามากขึ้นจะทำให้พลังงานที่เอาต์พุตลดลง ค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) และความกว้างของพัลส์ (FWHM) มีค่าลดลง ส่วนตัวประกอบคุณภาพ (Q) มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถวัดค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดคือ 0.0039 องศาต่อชั่วโมง ค่า FSR เท่ากับ 19 นาโนเมตร FWHM เท่ากับ 1.48 นาโนเมตร และค่า Q เท่ากับ 1047

4.1.2 ย่านของความยาวคลื่น

ค่าการลดทอนและการบานออกของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับย่านของความยาวคลื่นที่เลือกใช้ โดยย่านของความยาวคลื่นตามมาตรฐานแบ่งออกเป็น 6 ย่านความยาวคลื่นดังตารางที่ 4.1

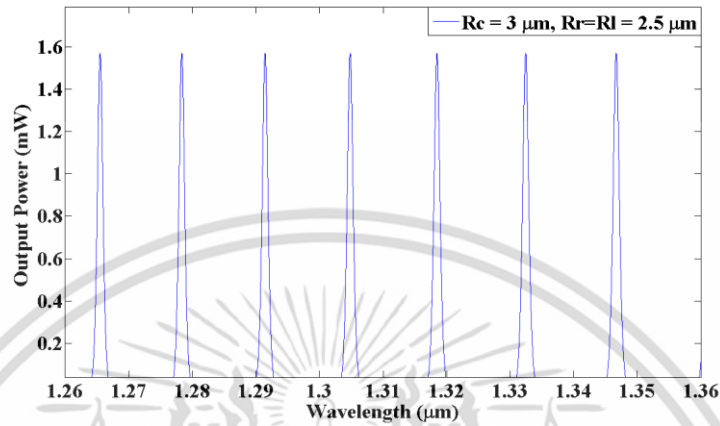
ตารางที่ 4.1 ย่านของความยาวคลื่น

ย่าน	รายละเอียด	ช่วงความยาวคลื่น (nm)
O	original	1260 ถึง 1360
E	extended	1360 ถึง 1460
S	short wavelength	1460 ถึง 1530
C	conventional ("erbium window")	1530 ถึง 1565
L	long wavelength	1565 ถึง 1625
U	ultralong wavelength	1625 ถึง 1675

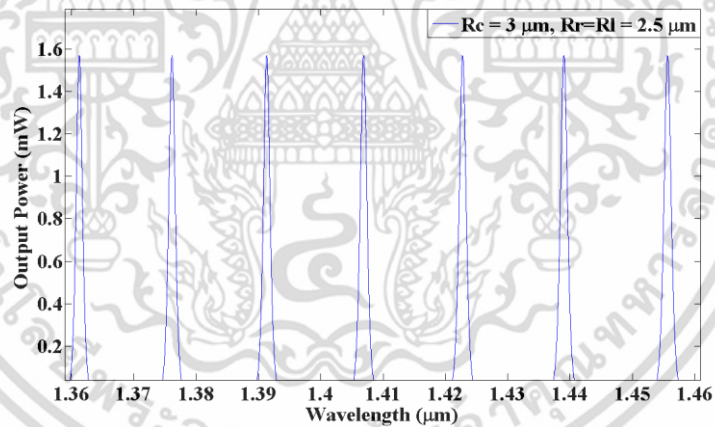
ซึ่งย่านของความยาวคลื่น (O) เป็นย่านแรกที่มีค่าการสูญเสีย (Loss) ที่สูง จึงเหมาะกับการสื่อสารระยะใกล้ ถัดมาเป็นย่านของความยาวคลื่น (E) จะมีค่าการสูญเสียที่น้อยกว่าและสัญญาณในช่วงนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่บานออก ย่านของความยาวคลื่น (S) และ (C) เป็นย่านที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพราะมีค่าการลดทอนของสัญญาณที่ต่ำและส่งสัญญาณได้ไกล สามารถจำลองสัญญาณเอาต์พุตตามย่านของความยาวคลื่นต่างๆได้ดังรูปที่ 4.33 ถึง 4.38

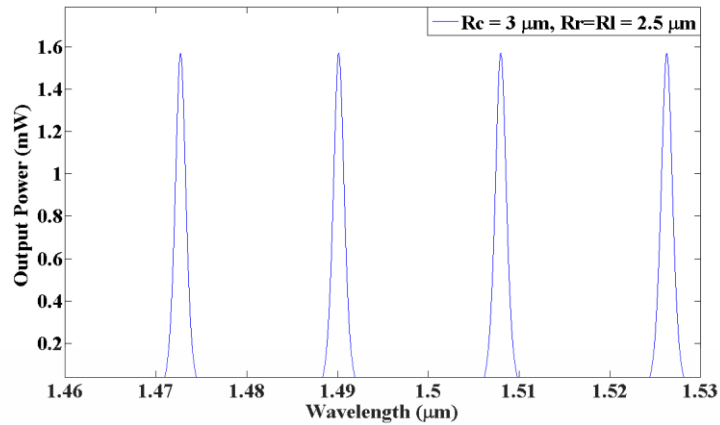


รูปที่ 4.33 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน O

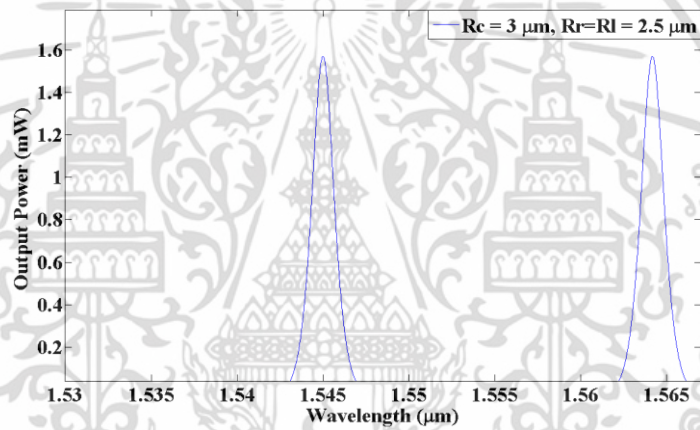


รูปที่ 4.34 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน E

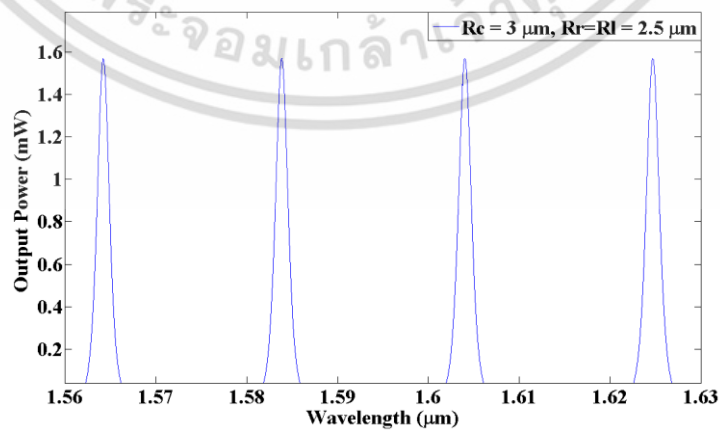
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน S

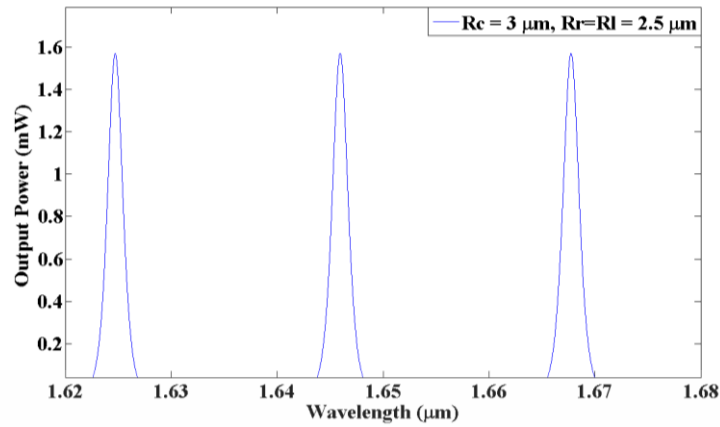


รูปที่ 4.36 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน C



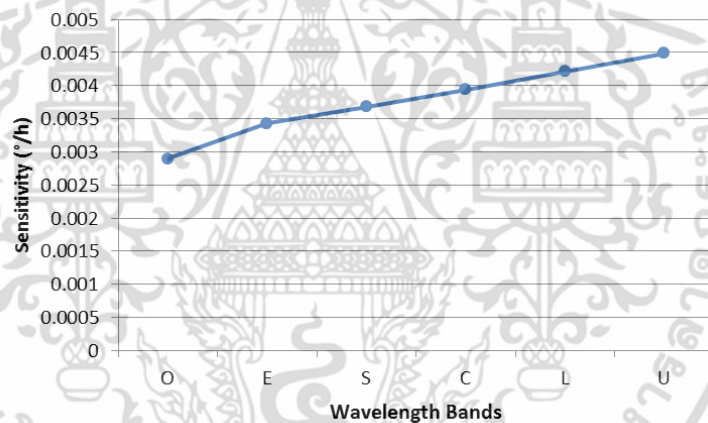
รูปที่ 4.37 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

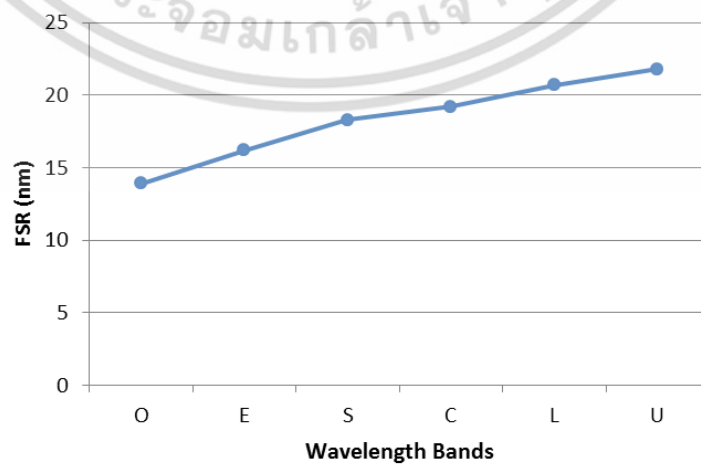


รูปที่ 4.38 สัญญาณเอาต์พุตของความยาวคลื่นย่าน U

สามารถวัดค่า Sensitivity, FSR, FWHM และ Q ตามย่านของความยาวคลื่นต่างๆได้ดังรูปที่ 4.39 ถึง 4.42 ตามลำดับ

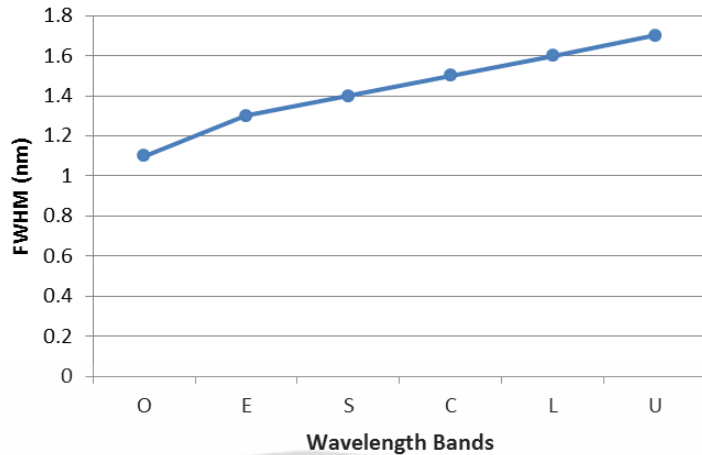


รูปที่ 4.39 ค่า Sensitivity ตามย่านของความยาวคลื่น

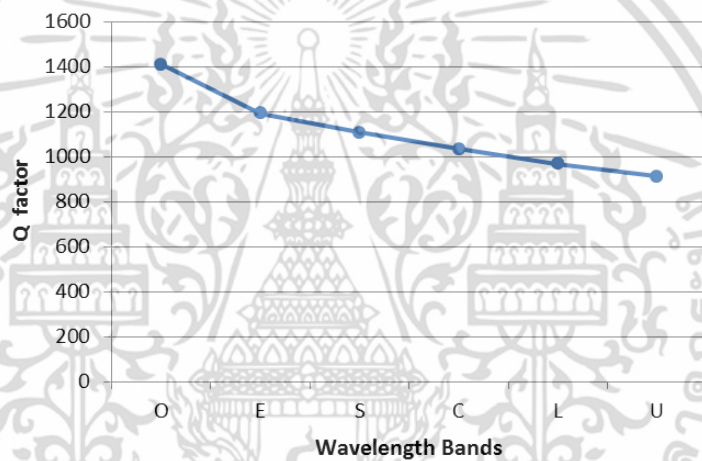


รูปที่ 4.40 ค่า FSR ตามย่านของความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ค่า FWHM ตามย่านของความยาวคลื่น

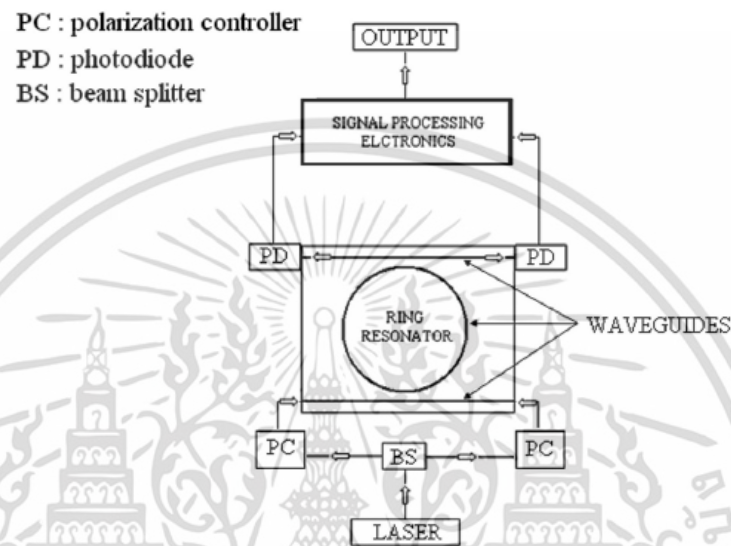


รูปที่ 4.42 ค่า Q ตามย่านของความยาวคลื่น

สรุปผลของสัญญาณเอาต์พุตที่ย่านความยาวคลื่นต่างๆพบว่า ย่านของความยาวคลื่น (O) จะมีความยาวคลื่นที่กำทอนมากที่สุด แต่มีพลังงานเอาต์พุตที่เท่ากันกับย่านอื่น สามารถวัดค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดคือ 0.0029 องศาต่อชั่วโมง ค่า FSR เท่ากับ 13.9 นาโนเมตร FWHM เท่ากับ 1.1 นาโนเมตร และค่า Q เท่ากับ 1409 แต่เนื่องจากย่านความยาวคลื่น (O) นี้มีค่าการสูญเสียที่สูงจึงไม่เหมาะที่จะใช้งาน

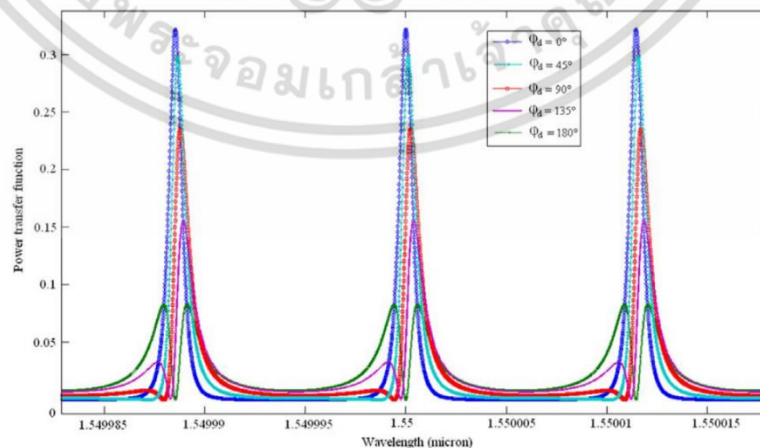
4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Caterina และคณะ [14] นำเสนอเซนเซอร์โพลาริซชันเชิงแสงโดยใช่วงแหวนสั่นพ้อง ในการทดลองจะใช้สัญญาณแสงสองลำป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อทำการเปรียบเทียบความต่างเฟสที่เกิดขึ้นตามปรากฏการณ์ของแซ็กแน็คดังรูปที่ 4.43



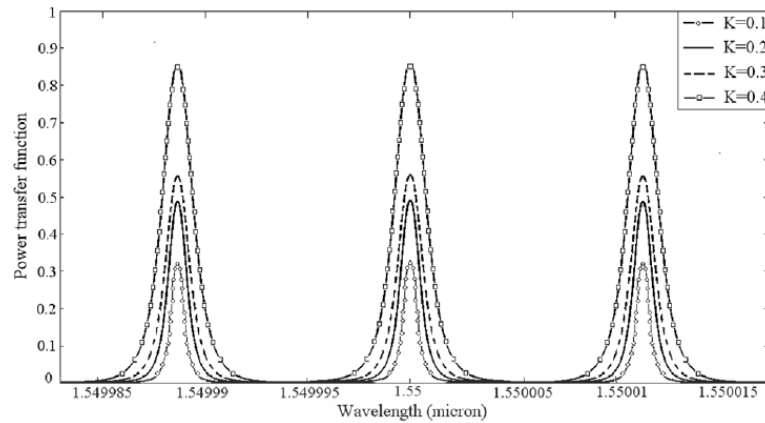
รูปที่ 4.43 โครงสร้างของเซนเซอร์โพลาริซชันเชิงแสง

วัดค่ากำลังที่เอาต์พุตเทียบกับช่วงของความยาวคลื่น โดยปรับเปลี่ยนค่าเฟส (ϕ) และค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง (κ) แสดงดังรูปที่ 4.44 และ 4.46 ตามลำดับ



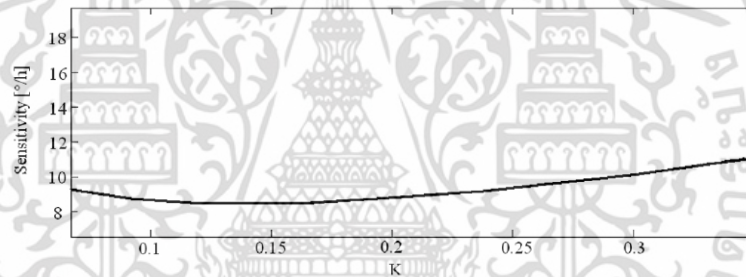
รูปที่ 4.44 สัญญาณเอาต์พุตตามค่าเฟส (ϕ) ระหว่าง 0° ถึง 180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 สัญญาณเอาต์พุตตามค่า κ ระหว่าง 0.1 ถึง 0.4

จากนั้นทำการวัดค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ของเซนเซอร์ที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง (κ) ได้ดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Sensitivity กับค่า κ

โดยค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดวัดได้ 8 องศาต่อชั่วโมง โดยมีค่า κ เท่ากับ 0.1 กำหนดรัศมีของวงแหวนเท่ากับ 2.3 เซนติเมตร ค่าการสูญเสียในการเดินทางของแสงคือ 0.1 เดซิเบลต่อเซนติเมตร และค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านเท่ากับ 0.2 เดซิเบล เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของโพรสโคปที่สำคัญระหว่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้พบว่าวงแหวนสั่นพ้องแพนด้าให้ผลที่ดีกว่าเนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดที่เล็กลง มีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) มีคุณสมบัติเป็นเวอร์เนียร์สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของไจโรสโคปเชิงแสง

ผู้วิจัย	ประเภทอุปกรณ์	Cavity length	Scale factor (Hz/rad s ⁻¹)	Sensitivity (°/h)	ARW (°/√h)
Vannahme et al. ¹⁹	Single Ring	188.4 mm	3.87 x 10 ⁴	7	0.026
Hsiao et al. ²⁰	Add/Drop	56.1 mm	1.66 x 10 ⁴	3	0.01
Ma et al. ²¹	Single Ring	59.7 mm	1.20 x 10 ⁴	15	0.056
Ciminelli et al. ²²	Add/Drop	94.8 mm	1.90 x 10 ⁴	0.2	0.0075
DSP-1760 ²⁵	IFOG		50 ppm	0.1	0.012
EMP-12K ²⁶	IFOG		25 ppm	0.01	0.002
วิทยานิพนธ์นี้	PANDA Ring	100.30 μm	8.33 ppm	0.0036	0.0015

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของไจโรสโคปเชิงแสง (ต่อ)

ผู้วิจัย	ประเภทอุปกรณ์	Ring Radius	K	FSR	FWHM	Sensitivity (°/h)
Kunbo Wang et al. ²³	Single Ring	2 cm	0.14	261 MHz		1.28
Hui Mao et al. ²⁴	Single Ring	1.25 cm	0.1	2.61 GHz	56.3 MHz	38.16
Ciminelli et al. ¹⁴	Add/Drop	2.3 cm	0.1		100 MHz	8
วิทยานิพนธ์นี้	PANDA Ring	R _c = 3 μm R _r = 2.5 μm	0.9	19.2 nm	271 kHz	0.0036

ไจโรสโคปแต่ละประเภทมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ได้แก่ ประเภทของอุปกรณ์ ขนาดของไจโรสโคป ค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) ค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเชิงมุม (Angle Random Walk) ค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง (K) ค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) ความกว้างของพัลส์ (FWHM) ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) และ ค่าไบอัส (Bias) เป็นต้น โดยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนออุปกรณ์ที่เรียกว่าวงแหวนสั่นพ้องแพนด้าที่ประกอบขึ้นจากวงแหวนสั่นพ้องเดี่ยวและแอดดรอปฟิลเตอร์ ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดที่เล็กลงระดับไมโครเมตรจึงทำให้โจโรสโคปนี้มีประสิทธิภาพที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความไวต่อการตรวจจับ ค่าสเกลแพกเตอร์ และค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเชิงมุมกับงานวิจัยอื่น

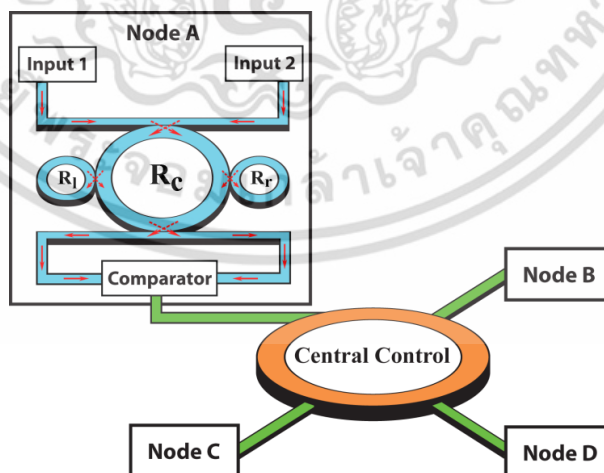
4.3 สรุปท้ายบท

จากการวิเคราะห์และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งประกอบไปด้วยขนาดรัศมีของวงแหวนสันพ้อง ความยาวคลื่นของสัญญาณ และค่าสัมประสิทธิ์ของการค้ำปลีง สามารถจำลองผลเอาต์พุตของโจโรสโคปและวัดค่าความไวต่อการตรวจจับ (Sensitivity) ความกว้างของพัลส์ (FWHM) ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) และค่าพิสัยสเปกตรัมอิสระ (FSR) เพื่อให้ได้ค่าความไว ($\delta\Omega$) ในการตรวจจับที่สั้นลงจำเป็นต้องลดค่า FWHM หรือเพิ่มค่า Q ที่ความถี่เฉพาะ และเพิ่มค่า SNR เนื่องจากค่า Q จะขึ้นกับค่าการสูญเสียจากการเดินทางของแสง ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านและค่าสัมประสิทธิ์ของการค้ำปลีง ซึ่งโครงสร้างของโจโรสโคปโดยใช้วงแหวนสันพ้องแพนด้าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้เมื่อเปรียบเทียบกับโจโรสโคปที่ใช้แอตดรอปปิลเตอร์หรือวงแหวนสันพ้องเดี่ยว

สรุปผลการวิจัยและแนวทางพัฒนาในอนาคต

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเซนเซอร์โพลาริโกราฟีเชิงแสงขนาดไมโครเมตรโดยใช้วงแหวนสั่นพ้องแพนด้าและวงจรป้อนกลับ โดยวิเคราะห์โครงสร้างของวงแหวนสั่นพ้องด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และจำลองผลการส่งผ่านของสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นในวงแหวนสั่นพ้องแพนด้าด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมกับออกแบบโครงสร้างสามมิติด้วยโปรแกรม 3D FDTD เพื่อจำลองการทำงานของเซนเซอร์โพลาริโกราฟีเชิงแสงในระบบสามมิติ สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากสมการคณิตศาสตร์ที่กำหนดได้แก่ ความยาวคลื่น ขนาดรัศมีของวงแหวน มุมของเฟส ค่าสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิง ค่ากำลังอินพุต ค่าดัชนีหักเห และค่าลดทอนของสัญญาณ การหาความสัมพันธ์ของสัญญาณที่วัดได้ขณะที่ค่าเฟสเปลี่ยนแปลง และสามารถชดเชยสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงได้โดยใช้วงจรป้อนกลับ สามารถคำนวณหาตัวชี้วัดประสิทธิภาพตามคุณลักษณะของโพลาริโกราฟีได้แก่ ค่าความไวต่อการตรวจจับ ค่าสเกลแพกเตอร์ และค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเชิงมุม ซึ่งผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ผู้วิจัยได้นำเสนอนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโพลาริโกราฟีเชิงแสงได้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

การตรวจวัดแบบทุกทิศทางต้องอาศัยเซนเซอร์แบบกระจายตัว (Distributed Sensor) ที่สามารถทำงานร่วมกับเซนเซอร์ความแรงและระบบนำทาง ตัวอย่างคือโครงสร้างแบบดาว โดยมีโหนดของเซนเซอร์ต่างๆที่เชื่อมต่อถึงกันผ่านตัวควบคุมกลาง (Central Control) ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เซนเซอร์โพลาริโกราฟีแบบโครงข่ายดาว

ประกอบด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านเท่าแทนเซนเซอร์ในแต่ละโหนดที่สามารถตรวจวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุและแจ้งผลกลับมาที่ตัวควบคุมกลางเพื่อประมวลสัญญาณ และชดเชยสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยการป้อนกลับสัญญาณ ทำให้ระบบสามารถอยู่ในสถานะสมดุลได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. J. Mason. "Feedback theory-some properties of signal flow graphs," Proc. IRE., Vol. 41, pp. 1144–1156, September 1953.
- [2] S. J. Mason. "Feedback theory-further properties of signal flow graphs," Proc. IRE., Vol. 44, No. 7, pp. 920–926, July 1956.
- [3] G. Griffel, "Vernier effect in asymmetrical ring resonator arrays," IEEE Photonics Technology Lett., Vol. 12, No. 12, pp. 1642–1644 December 2000.
- [4] B. E. Little, S. T. Chu, J. V. Hryniewicz and P. P. Absil, "Filter synthesis for periodically coupled microring resonators," Optics Letters, Vol. 25, No. 5, pp. 344–346, March 2000.
- [5] S. T. Chu, B. E. Little, W. Pan, T. Kaneko and Y. Kokubun, "Cascaded Microring Resonators for Crosstalk Reduction and Spectrum Cleanup in Add-Drop Filters," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 11, pp. 1423–1425, November 1999.
- [6] E. A. J. Marcatili, "Bends in Optical Dielectric Guides," Bell. Syst. Tech. J., Vol. 48, pp. 2103–2132, September 1969.
- [7] S. C. Hagness, et al., "FDTD Microcavity Simulations: Design and Experimental Realization of Waveguide-Coupled Single-Mode Ring and Whispering-Gallery-Mode Disk Resonators," IEEE J. Lightwave Tech., Vol. 15, no. 11, pp. 2145–2165, November 1997.
- [8] D. Rafizadeh, et al., "Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6 nm free spectral range," Opt. Lett., Vol. 22, no. 16, pp. 1244–1246, August 1997.
- [9] B. E. Little, et al., "Ultra-Compact Si-SiO₂ Microring resonator Optical Channel Dropping Filters," IEEE Photon. Techn. Lett., Vol. 10, no. 4, pp. 549–551, April 1998.
- [10] D. J. W. Klunder, et al., "Vertically and laterally waveguide-coupled cylindrical microresonators in Si₃N₄ on SiO₂ technology," Appl. Phys. B, Vol. 73, pp. 603–608, November 2001.
- [11] B. Vanderhaegen, et al., "High Q GaInAsP ring resonator filters," ECIO'99, Torino Italy, pp. 381–384, April 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] M. K. Chin et al., “GaAs Microcavity Channel-Dropping Filter based on a Race-Track Resonator,” *IEEE Photon. Techn. Lett.*, Vol. 11, no. 12, pp. 1620–1622, December 1999.
- [13] K. Suzuki, K. Takiguchi and K. Hotate, “Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit,” *J. Lightwave Technology*, Vol. 18, pp. 66–72, 2000.
- [14] C. Ciminelli, C. E. Campanella, and M. N. Armenise, “Optimized Design of Integrated Optical Angular Velocity Sensors Based on a Passive Ring Resonator,” *IEEE J. Lightwave Tech.*, Vol. 27, no. 14, pp. 2658–2666, July 2009.
- [15] S. Xiao, M. H. Khan, et al., “Silicon-on-Insulator Microring Add-Drop Filters With Free Spectral Ranges Over 30 nm,” *IEEE J. Lightwave Tech.*, Vol. 26, no. 2, pp. 228–236, January 2008.
- [16] J.K.S. Poon, J. Scheuer, et al., “Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides,” *Opt. Express*, Vol. 12, pp. 90–103, 2004.
- [17] M. Mancinelli, R. Guider, M. Masi, et al., “Optical characterization of a SCISSOR device,” *Opt. Exp.*, Vol. 19, No. 14, pp. 13664–13674, 2011.
- [18] FDTD Solutions by Lumerical Solutions, Inc., ver. 8.7.3, 2013.
- [19] C. Vannahme et al., “Integrated optical Ti:LiNbO₃ ring resonator for rotation rate sensing,” *Int. Conf. (ECIO)*, Denmark, 2007.
- [20] Hsien-kai Hsiao and K. A. Winick, “Planar glass waveguide ring resonators with gain,” *Opt. Express*, 2007.
- [21] Ma et al., “Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using phase modulation spectroscopy technique,” *Opt. Eng.* 45, 2006.
- [22] Ciminelli et al., “A new integrated optical angular velocity sensor,” *Proc. SPIE* 5728, 2005.
- [23] Kunbo Wang, Lishuang Feng, et al., “Alternative method for design and optimization of the ring resonator used in micro-optic gyro,” *Applied Optics*, Vol. 52, No. 7, pp. 1481–1486, 2013.
- [24] Hui Mao, Huilian Ma, and Zhonghe Jin, “Polarization maintaining silica waveguide resonator optic gyro using double phase modulation technique,” *Optics Express*, Vol. 19, No. 5, 2011.

- [25] KVH Industries, Inc., 2016. DSP-1760 Fiber Optic Gyro, [Online].Available : <http://www.kvh.com/Commercial-and-OEM/Gyros-and-Inertial-Systems-and-Compasses/Gyros-and-IMUs-and-INS/Fiber-Optic-Gyros/DSP-1760.aspx>
- [26] EMCORE Corp., 2016. EMP-1.2K Fiber Optic Gyroscope, [Online].Available : <http://emcore.com/products/emp-1-2k-fiber-optic-gyroscope-fog>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชัยวัฒน์ ศิระวัฒนานนท์
วัน เดือน ปีเกิด	8 กุมภาพันธ์ 2530 ที่จังหวัดสระบุรี
ที่อยู่	154 หมู่ 2 ต.หน้าพระลาน อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี 18240
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ 2553 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB, Optiwave 2.) การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 3.) การจัดการฐานข้อมูล
ประสบการณ์การทำงาน	2557 – 2559 นักวิเคราะห์และออกแบบระบบ Account Opening & Review บริษัท หลักทรัพย์ฟิลลิป (ประเทศไทย) จำกัด นักวิเคราะห์และออกแบบระบบ Middle Office บริษัทหลักทรัพย์ฟิลลิป (ประเทศไทย) จำกัด 2555 – 2556 อาจารย์พิเศษสาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย รามคำแหง นักวิเคราะห์และออกแบบระบบ Loss Recovery Project (LR) บริษัท ทู คอร์ ปอเรชั่น จำกัด 2554 นักวิเคราะห์และออกแบบระบบ Web and Windows Mobile Inventory บริษัท พีทีที ฟินอล จำกัด 2553 นักวิเคราะห์และออกแบบระบบ โครงการจัดทำระบบการติดตามและรายงานผล การดำเนินงานตามแผนการฟื้นฟู การอนุรักษ์ป่าและดิน การทำฝาย กระทรวง ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2552 นักวิเคราะห์และออกแบบระบบ Module Controller (McHGA) บริษัท เวส เทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2551

นักวิเคราะห์และออกแบบระบบงานบุคลากร กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข
นักวิเคราะห์และออกแบบระบบฐานข้อมูลเครือข่ายสมาชิกธงฟ้า เพื่อลดภาระค่า
ครองชีพประชาชน กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์

ผลงานวิจัย

1. C. Sirawattananon, S. Mitatha, P. Bunyatnokrat, S. Punthawanunt and P.P. Yupapin, "A Proposal of a High Resolution Tunable Visible Laser Source Generation," The 9th International Symposium on Communications And Information Technology (ISCIT 2009), Songhdo-iFEZ Convensia, Incheon, Korea, September 28-30, 2009. pp. 1235-1236.
2. C. Sirawattananon, M. Bahadoran, J. Ali, S. Mitatha, and P.P. Yupapin, "Analytical Vernier Effects of a PANDA Ring Resonator for Micro Force Sensing Application," IEEE Transactions on nanotechnology, vol. 11, no. 4, pp. 707-712, Jul. 2012.
3. W. Sa-Ngiamsak, C. Sirawattananon, K. Srinuanjan, S. Mitatha, and P. P. Yupapin, "Micro-Optical Gyroscope Using a PANDA Ring Resonator," IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 8, pp. 2609-2613, Aug. 2012.
4. S. Mitatha, C. Sirawattananon, J. Ali, and P. P. Yupapin, "Four Point Probe Micro Optical Gyroscope with Self Calibration Control," IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 7, pp. 2705-2710, Jul. 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้