

การศึกษาอิทธิพลของค่าเฉลี่ยของโพลีไดมอดมอดซึ่งทางแสงในโพลีเมอร์คัปเปิลอร์ที่โคปด้วย
เจอร์เมเนียมชนิดสองและสามแกน

NUMERICAL STUDY OF ALL-OPTICAL SOLITON SWITCHING IN TWO AND
THREE CORES GERMANIUM-DOPED FIBER COUPLERS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของวารสารศึกษานานาชาติของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตศึกษาดุษฎี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISSN 974-15-1869-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาวิธีทางตัวเลขของโซลิตอนสวิตซ์ทางแสงในไฟเบอร์คัปเปิลอร์ที่โดปด้วย
เออร์เบียมชนิดสองและสามแกน

NUMERICAL STUDY OF ALL-OPTICAL SOLITON SWITCHING IN TWO AND
THREE CORES ERBIUM-DOPED FIBER COUPLERS



ชัยณรงค์ แท้พานิช
CHAINARONG TAE PANICH

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 60544
วัน,เดือน,ปี... - 3 ก.ค. 2549

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548
ISBN 974-15-1869-2

**NUMERICAL STUDY OF ALL-OPTICAL SOLITON SWITCHING IN TWO AND
THREE CORES ERBIUM-DOPED FIBER COUPLERS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-1869-2



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGHUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาวิธีทางตัวเลขของ โซลิตอนสวิตชิงทางแสงใน ไฟเบอร์คัปเปิลเลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมชนิดสองและสามแกน
นักศึกษา	นาย ชัยณรงค์ แต้พานิช
รหัสประจำตัว	45064020
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของ โซลิตอนทางแสงในคัปเปิลเลอร์ไม่เชิงเส้นที่โคปด้วยเออร์เบียมทั้งชนิดสอง และสามแกน ซึ่งสามารถทำนายได้โดยการแก้ระบบสมการที่คัปปลิงกันของสมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้น โดยค่าพารามิเตอร์ ต่างๆ เช่น ความยาวของคัปเปิลเลอร์ อัตราขยายของตัวกลาง การกระจายของแกน และการอิมพัลส์ของแกน ได้ถูกนำมาพิจารณาในสมการดังกล่าว ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณที่ได้ของคัปเปิลเลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมสำหรับการใช้ อินพุตพัลส์โซลิตอนแสดงให้เห็นว่ามีความคมชัดของสัญญาณการสวิตที่ชัดเจน และใช้กำลังงาน การสวิตที่ต่ำกว่าคัปเปิลเลอร์ที่ไม่ได้โคป นอกจากนี้เรายังแสดงให้เห็นว่าคัปเปิลเลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมชนิดสามแกนแบบอะเรียให้ลักษณะการสวิต โซลิตอนทางแสงที่ดีกว่าทั้งคัปเปิลเลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมชนิดสองแกน และคัปเปิลเลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งลักษณะที่ได้คล้ายสวิตในอุดมคติโดยคู่ได้จากความคมชัดที่เป็นลักษณะฟังก์ชันขั้นบันไดและใช้กำลังงานในการสวิตที่ต่ำ ผลของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัดทำให้ความคมชัดในการสวิตแย่ง และต้องใช้กำลังงานการสวิตที่สูงขึ้น นอกจากนี้เรายังแสดงให้เห็นว่าเมื่อผลของพารามิเตอร์การอิมพัลส์ของแกนที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการสวิตจะลดลง ในการศึกษาอาจเพิ่มเติมผลอื่นๆเข้าไปได้อีก เช่น การเลื่อนของความถี่ด้วยตัวเอง และการกระจายอันดับที่สาม ในท้ายที่สุดนี้เรายังแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะมีการสวิต การขยาย และการบีบอัดสัญญาณทางแสงในอุปกรณ์เพียงตัวเดียว ซึ่งคำตอบที่ได้โดยวิธีทางตัวเลขนี้ได้นำไปใช้พิจารณาในการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบอุปกรณ์เครือข่ายสื่อสารทางแสงความเร็วสูง

Thesis Title NUMERICAL STUDY OF ALL-OPTICAL SOLITON SWITCHING
IN TWO AND THREE CORES ERBIUM-DOPED FIBER
COUPLERS

Student Mr. Chainarong Taepanich

Student ID. 45064020

Degree Master of Science

Programme Applied Physics

Year 2005

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Preecha Yupapin



ABSTRACT

A numerical study of the optical soliton switching properties in erbium-doped two and three core nonlinear directional couplers which can be predicted by solving the dimensionless Coupled system of Nonlinear Schrödinger equations is presented. The parameters such as coupler length , medium gain , gain dispersion , and gain saturation are employed in the CNLS equations. The transmission characteristics of erbium-doped coupler for soliton input pulses to show that sharper switching behavior and a lower switching power than for an identical undoped coupler. Here, we show that a erbium-doped three-core coupler array offers the better optical soliton switching properties than erbium-doped two-core and erbium-doped triangular three-core couplers because it shows device characteristics in contrast to ideal switching which is characterized by a step function and use lower switching power. The finite gain bandwidth is found to lead to a deterioration of the sharp switching behavior and increasing switching power. We have shown that when gain saturation parameter is increased, the switching efficiency will decrease. The algorithm employed for this study is straightforward so that other effects such as the self-frequency shift and third-order dispersion can readily be included. Finally, we have shown that it is possible to obtain all-optical switching, amplification , and compression of short pulses in a single device and the physical behaviors of the optical output signals obtained by numerical technique which consider a suitable parameter for the high speed optical networking communication.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน ที่ให้โอกาสเสมอมาและมีส่วนอย่างมากในการกระตุ้นทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบคุณ ดร.นุพันธ์ เจียวไม่้งาม ที่ให้คำแนะนำในหลายๆด้านโดยเฉพาะทางด้านการเขียนโปรแกรม

ขอขอบคุณ คุณ ฐาปนีย์ บ้านหมู่ ที่คอยให้กำลังใจและให้โอกาสเสมอมา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกท่าน ตลอดจนรุ่นพี่และรุ่นน้องนักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ให้คำปรึกษาด้านข้อมูลที่เกี่ยวข้องทางด้านทฤษฎีและด้านเครื่องมือใช้งานต่าง ๆ ตลอดจนกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชัยณรงค์ เต็มพานิช



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	คัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Couplers).....	23
2.3.1	บีมของคลื่นต่อเนื่องที่กำลังต่ำ (Low-Power Continuous Wave Beams).....	23
2.3.2	การสวิตแบบกึ่งคลื่นต่อเนื่อง (Quasi-CW Switching).....	27
2.4	การกระจายความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion, GVD).....	28
2.5	ลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง (Nonlinearity).....	30
2.6	สมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้น(Nonlinear Schrödinger Equation ,NLS).....	31
2.6.1	โซลิตอนพื้นฐาน (Fundamental soliton ; N = 1).....	31
2.6.2	โซลิตอนอันดับสูง (Higher-order solitons).....	32
2.7	รูปแบบของคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงไม่เชิงเส้นแบบสอง และ สามแกน (Two and Three Core Nonlinear Directional Couplers).....	32
2.8	สมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้นที่คัปปลิงกัน (Coupled Nonlinear Schrödinger Equation, CNLS).....	34
2.8.1	กรณีเกนแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth).....	35
2.8.2	กรณีเกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth).....	35
2.8.3	กรณีผลการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation).....	36
2.9	ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบีต (Half-Beat Length).....	39
2.10	วิธีการทางตัวเลข (Numerical Method).....	39
2.11	เมธอดออฟไลน์(Method Of Lines, MOL).....	40
2.12	ประสิทธิภาพในการสวิตทางแสง.....	41
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1	การทดสอบโปรแกรมเบื้องต้น.....	45
3.1.1	การศึกษาระยะคัปปลิงของคัปเปิลอร์.....	45
3.1.2	การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลอร์ที่ไม่มีการโคป.....	45
3.1.3	การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน ที่มีการ โคปกรณีเกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth).....	45
3.1.4	การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนที่มี การ โคปกรณีเกนแบนด์วิดท์จำกัด (Finite Gain Bandwidth).....	45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ที่มีการ โดปกรณีเกิน แบนด์วิดธ์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth).....	46
3.2.1 การศึกษาเกินแบนด์วิดธ์ที่ไม่จำกัดที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน.....	46
3.2.2 การศึกษาเกินแบนด์วิดธ์ไม่จำกัดที่ส่งผลต่อรูปสัญญาณโซลิตอนใน คัปเปอเรอร์.....	46
3.3 การศึกษาการปรับเปลี่ยนความยาวของคัปเปอเรอร์ที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบิต	46
3.4 การศึกษาสัดส่วนการบีบอัดตัวของสัญญาณเนื่องจากเกินแบนด์วิดธ์มีค่าไม่ จำกัด.....	46
3.5 การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ที่มีการ โดปกรณีเกิน แบนด์วิดธ์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth).....	47
3.5.1 การศึกษาเกินแบนด์วิดธ์ที่จำกัด ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน	47
3.5.2 การศึกษาเกินแบนด์วิดธ์ที่จำกัดต่อรูปสัญญาณโซลิตอนในคัปเปอเรอร์ที่มี การ โดป.....	47
3.6 การศึกษาการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation)	47
3.6.1 การศึกษาการอิ่มตัวของเกนที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน	47
3.6.2 การศึกษาการอิ่มตัวของเกน ที่ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณ	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	48
4.1 ผลการทดสอบโปรแกรมเบื้องต้น.....	48
4.1.1 ผลการศึกษาระยะคัปปลิงของคัปเปอเรอร์.....	48
4.1.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ที่ไม่มีการ โดป	50
4.1.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ชนิดสองแกน ที่มีการ โดปกรณีเกินแบนด์วิดธ์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth).....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ชนิดสองแกน ที่มีการ โดปกรณีแกนแบนด์วิดท์จำกัด (Finite Gain Bandwidth).....	54
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ที่มีการ โดปกรณี แกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth).....	55
4.2.1 ผลการศึกษาแกนแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัด ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของ โซลิตอน.....	55
4.2.2 ผลการศึกษาแกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัดที่ส่งผลต่อรูปสัญญาณ โซลิตอนใน คัปเปอเรอร์.....	65
4.3 ผลการศึกษาการปรับเปลี่ยนความยาวของคัปเปอเรอร์ที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบิต	69
4.4 ผลการศึกษาสัดส่วนการบีบอัดตัวของสัญญาณเนื่องจากแกนแบนด์วิดท์มีค่าไม่จำกัด	74
4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ที่มีการ โดปกรณีแกน แบนด์วิดท์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth).....	76
4.5.1 ผลการศึกษาของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัดที่ส่งผล ต่อคุณสมบัติการสวิตของ โซลิตอน.....	76
4.5.2 ผลการศึกษาแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัดต่อรูปสัญญาณ โซลิตอนในคัปเปอเรอร์ ที่มีการ โดป.....	80
4.6 ผลการศึกษาการอิ่มตัวของแกน (Gain Saturation)	83
4.6.1 ผลการศึกษาการอิ่มตัวของแกนที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของ โซลิตอน	83
4.6.2 ผลการศึกษาการอิ่มตัวของแกน ที่ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณ	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
5.3 แนวทางในการวิจัยและการพัฒนา.....	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	102



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง.....	5
2.2 แสดงประเภทของเส้นใยนำแสง.....	6
2.3 แสดงการหักเหและการสะท้อนของแสงในกรณี $n_1 > n_2$	7
2.4 แสดงมุมการรับแสงตกกระทบของเส้นใยนำแสง.....	8
2.5 แสดงโหมคของสนามไฟฟ้าในตัวนำแบบระนาบ.....	9
2.6 แสดงการเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณและพัลส์ที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้เนื่องจากการกระจายของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง.....	11
2.7 การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ.....	12
2.8 การกระจายเชิงความยาวคลื่นที่เกิดในใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....	14
2.9 แสดงทางเดินของรังสีตามแกนและรังสีเมอริเดียนในใยแก้วนำแสงหลายโหมคชนิดสเต็ปอินเด็กซ์.....	15
2.10 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของแสงกับวัตถุเมื่อมีการดูดกลืนแสงและการแผ่รังสีแสง.....	17
2.11 แสดงการป้อนแบบหลายระดับ.....	18
2.12 การลดทอนของแสงเนื่องจากถูกวัสดุดูดกลืน.....	19
2.13 การขยายขนาดของสัญญาณแสงในวัสดุตัวกลางกำเนิดเลเซอร์.....	20
2.14 วิธีการพิจารณาหาค่าอัตราการขยายแสง.....	20
2.15 แสดงการขยายสัญญาณทางแสง.....	21
2.16 แสดงระดับพลังงานของเออร์เบียมในใยแก้วนำแสง.....	22
2.17 แสดงค่าอัตราการขยายที่ขึ้นความยาวคลื่นของใยแก้วนำแสงที่โคปด้วยเออร์เบียม.....	22
2.18 แสดงคัปเปิลอร์ทางแสง.....	23
2.19 แสดงตัวนำแบบฟิล์ม.....	24
2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $P_2(z)$ กับ Kz	26
2.21 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความเร็วกลุ่ม.....	28
2.22 แสดงเชิร์พ (chirp) ความถี่เนื่องจาก เซลเฟสมอดูเลชัน.....	30
2.23 แสดงการเคลื่อนตัวของโซลิตอนพื้นฐาน.....	32
2.24 แสดงการเคลื่อนตัวของโซลิตอนอันดับสาม.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 ลักษณะการจัดวางแกนต่างๆในคัปเปิลอร์ (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า.....	33
4.1 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิด กรณีไม่มีการโคป (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ ระยะคัปปลิงเท่ากับสี่เท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวบิตของแต่ละกรณี เมื่อพิกกำลังงานอินพุต เท่ากับ 1 ($K = 1, \Gamma = \mu = s = 0$).....	48
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านสัญญาณของคัปเปิลอร์ที่ไม่มีการโคป กับ ค่าพิกกำลังงานขาเข้า (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบ สามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \Gamma = \mu = s = 0$).....	50
4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ ค่าพิกกำลังงานอินพุต ที่แกนที่ 1 โดย เปรียบเทียบกับของกรณีมีการโคป($\Gamma = 0.15$) และไม่มีการโคป($\Gamma = 0$) ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของ ความยาวบิตเท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25, \mu = s = 0$).....	52
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงาน อินพุต ที่แกนที่ 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต เท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25, \mu = s = 0$).....	53
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุต ที่แกนที่ 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าของ μ เมื่อ Γ มีค่าเท่ากับ 0.15 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต เท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25, s = 0$).....	54
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ ชนิดสองแกน โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 ใช้ระยะทาง ครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/2$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	55
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ที่สัมพันธ์กับรูปที่ 4.6 เมื่อ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2.....	55
4.8 แสดงรูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนสำหรับค่ากำลังงาน อินพุตที่ต่ำและสูงกว่ากำลังการสวิตของโซลิตอนที่สอดคล้องกับรูป 4.7 โดยกำลังงานการสวิต มีค่าประมาณ 3.16 และ $\Gamma = 0.15$ (ก) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 2.5 (ข) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi / \sqrt{2}$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	57
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่า Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi / \sqrt{2}$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	58
4.11 แสดงรูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ สำหรับค่ากำลังงานอินพุตที่ต่ำและสูงกว่ากำลังการสวิทของโซลิตอนที่สอดคล้องกับรูป 4.10 โดยกำลังงานการสวิทมีค่าประมาณ 3.5 และ $\Gamma = 0.15$ (ก) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 2.8 (ข) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5.....	59
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi / 3$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	60
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi / 3$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	61
4.14 แสดงรูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า สำหรับค่ากำลังงานอินพุตที่ต่ำและสูงกว่ากำลังการสวิทของโซลิตอนที่สอดคล้องกับรูป 4.13 โดยกำลังงานการสวิทมีค่าประมาณ 4.62 และ $\Gamma = 0.15$ (ก) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ข) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2.....	62
4.15 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนที่มีการเคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนอันเนื่องจากผลของแกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ก) $\Gamma = 0$ (ข) $\Gamma = 0.15$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi / 2$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนที่มีการเคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ เนื่องจากผลของแกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัดใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 4 (ก) $\Gamma = 0$ (ข) $\Gamma = 0.15$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi / \sqrt{2}$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	66
4.17 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนที่มีการเคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าอันเนื่องจากผลของแกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัดใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2 (ก) $\Gamma = 0$ (ข) $\Gamma = 0.15$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi / 3$ ($K = 1, \mu = s = 0$).....	67
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi$ ($K = 0.5, \mu = s = 0$).....	69
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการออร์มอลไลซ์ที่สัมพันธ์กับรูปที่ 4.18 (ก) แกน 1 (ข) แกน 2.....	69
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่า Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = 2\pi / \sqrt{2}$ ($K = 0.5, \mu = s = 0$).....	70
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการออร์มอลไลซ์กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่า Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = 2\pi / \sqrt{2}$ ($K = 0.5, \mu = s = 0$).....	71
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = 2\pi / 3$ ($K = 0.5, \mu = s = 0$).....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการออร์มอลไลซ์กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = 2\pi/3$ ($K = 0.5, \mu = s = 0$).....	73
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณ กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ของคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิดที่แกน 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่า Γ (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \mu = s = 0$).....	74
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/2$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$).....	76
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$).....	77
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/3$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$).....	78
4.28 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนอันเนื่องจากผลของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ก) $\mu = 0$ (ข) $\mu = 0.05$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/2$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$).....	80
4.29 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์อันเนื่องจากผลของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 4.0 (ก) $\mu = 0$ (ข) $\mu = 0.05$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$).....	81

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าอันเนื่องมาจากผลของแกนแบนควิควิต์ที่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2 (ก) $\mu = 0$ (ข) $\mu = 0.05$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/3$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$)82	82
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ s (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/2$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$).....83	83
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับพิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ s (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$).....84	84
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ s (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/3$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$).....85	85
4.34 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน อันเนื่องมาจากการอิมิตัวของแกน ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ก) $s = 0$ (ข) $s = 1$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/2$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$).....87	87
4.35 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์อันเนื่องจากการอิมิตัวของแกน ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 4.0 (ก) $s = 0$ (ข) $s = 1$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$).....88	88
4.36 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าอันเนื่องจากการอิมิตัวของแกน ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2 (ก) $s = 0$ (ข) $s = 1$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/3$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$).....89	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการใช้เส้นใยนำแสงกันอย่างแพร่หลายซึ่งมีข้อดีในเรื่องของขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและสามารถให้คุณภาพของการรับและส่งสัญญาณที่ดีกว่าสายทองแดงมาก และสามารถรับสัญญาณได้จำนวนมากหรือมีแถบความถี่ที่กว้างกว่าสายทองแดง อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อเสียของสัญญาณภายในเส้นใยนำแสงอยู่ กล่าวคือในการรับและส่งสัญญาณในระยะทางไกลๆ นั้นก็ยังจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณเป็นระยะๆ ไป อันเนื่องมาจากการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยนำแสงซึ่งมีค่าโดยประมาณ 0.01 เดซิเบลต่อกิโลเมตร (dB/Km) จากหลักการของโซลิตอน (Soliton) ที่ว่าจากโซลิตอนที่ต้องการคือพัลส์ที่มีความเข้มสูงและไม่มีการกระจาย (Dispersion) ซึ่งจะทำให้ได้พัลส์ที่สามารถเดินทางไปได้ไกล โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือลักษณะของสัญญาณ จึงได้มีการนำหลักการของโซลิตอนทางฟิสิกส์มาใช้ในการสื่อสารทางแสงทั้งนี้ก็เพื่อให้สามารถรับและส่งสัญญาณได้ในระยะทางไกลๆ และด้วยแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่มากขึ้นกว่าเดิม โซลิตอนได้เข้ามามีบทบาทในเรื่องของการสื่อสารทางแสงด้วยอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสูงถึง 10^{12} บิตต่อวินาที (Terabit/sec) พร้อมทั้งยังคงรูปร่างของพัลส์อยู่ได้ทั้งนี้ก็เพราะว่าการกระจายของพัลส์ได้หมดไปอันเป็นผลมาจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) ของเส้นใยแก้วนำแสง

การสวิตทางแสงมีความน่าสนใจเหนือการสวิตทางอิเล็กทรอนิกส์มากโดยเฉพาะความเร็วและแบนด์วิดท์ที่สูงกว่ามาก อุปกรณ์หนึ่งที่น่าสนใจในการสวิตทางแสงคือ คัปเปิลเลอร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Directional Coupler, NLDC) ซึ่งมีหลายชนิด แต่ที่ใช้กันแพร่หลายคือแบบสองและสามแกน ในการสวิตทางกำลังงาน (Power Switching) ของแสงเกิดขึ้นโดยการเพิ่มกำลังอินพุต (Input Power) สัญญาณจะเกิดการข้ามช่องของสัญญาณแสงจากแกนหนึ่งไปยังอีกแกนหนึ่งได้เมื่อถึงกำลังงานวิกฤต (Critical Power) คัปเปิลเลอร์ไม่เชิงเส้นที่ทำจากเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวจะมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นแบบเคอร์ (Kerr Nonlinearity) ซึ่งมีความสัมพันธ์ $n = n_0 + n_2 I$ เนื่องจากค่า n_2 ที่น้อยมากของซิลิกาที่ใช้ทำคัปเปิลเลอร์ ทำให้ต้องใช้กำลังงานอินพุตที่มากในการสวิตสัญญาณเพื่อที่จะให้เข้าถึงความไม่เป็นเชิงเส้นและทำการขยายสัญญาณจึงโคคัปเปิลเลอร์ด้วยสารบางชนิด เช่น เออร์เบียมไอออน โดยระดับของการปั๊ม (Pumping Level) และความเข้มขึ้นไอออนแสดงได้ด้วยค่าเกน (Gain) หรืออัตราขยาย ซึ่งเป็นตัวจำกัดค่าการสูญเสีย (Loss) ที่เป็นสาเหตุสำคัญในการทำให้คุณสมบัติการสวิตแ่ลงและใช้กำลังงานการสวิตที่เพิ่มมากขึ้น อีกปัญหาหนึ่งในการสวิตทางแสงคือการที่มีสัญญาณตกค้างขณะสวิต โดยเฉพาะบริเวณขอบปีกของสัญญาณ เพื่อแก้ปัญหานี้

และเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพการสวิตทางแสง โซลิตอนจึงได้เข้ามามีบทบาท เพราะด้วยความกว้างพัลส์ที่แคบและค่าความเข้มแสงที่สูงในการเข้าถึงปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นแบบเคอร์ [3,5]

เนื่องด้วยคุณสมบัติที่เด่นทั้งการขยาย บีบอัด และ การสวิตสัญญาณในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน ทำให้คัปเปิลอร์ใยแก้วที่โคปด้วยเออร์เบียม (Erbium-Doped Fiber Coupler)[3,5] เป็นอุปกรณ์ที่สนใจอย่างมากโดยเฉพาะเมื่อใช้อินพุตเป็นโซลิตอนจะทำให้การสวิตได้ด้วยความเร็วสูงมาก ประสิทธิภาพการสวิตที่ดี สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ศึกษาการสวิตทางกำลังในคัปเปิลอร์ที่ไม่ได้โคปชนิดสามแกน ผลปรากฏว่า ลักษณะความคมชัด (Sharp) ของสัญญาณที่ดีกว่าในคัปเปิลอร์ที่ไม่ได้โคปชนิดสองแกน [2] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของอัตราขยาย (Gain) กับคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงที่โคปด้วยเออร์เบียม (Erbium-Doped Optical Fiber Coupler) ซึ่งให้คุณสมบัติที่เหนือกว่าคัปเปิลอร์ที่ไม่มีการโคปไม่ว่าจะเป็นความคมชัดของสัญญาณและกำลังงานการสวิตที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสวิตที่ดี ส่วนผลการศึกษากรณีเกนแบนด์วิดท์ (Gain Bandwidth) หรือผลการกระจายของเกน (Gain Dispersion) ที่มีค่าสูงที่ซึ่งสอดคล้องกับความกว้างสัญญาณ (Pulse Width) ที่แคบมีผลทำให้คุณสมบัติการสวิตแย่ง [1,3,5,7] นอกจากนี้มีผลการศึกษาผลการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation) ในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนที่โคปด้วยเออร์เบียม โดยพบว่าการอิ่มตัวของเกน มีค่ามากจะทำให้ประสิทธิภาพในการสวิตสัญญาณ โซลิตอนแย่ง [8]

งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาแบบจำลองของโซลิตอนสวิตซิง (Soliton Switching) ในคัปเปิลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมทั้งชนิดแบบสองแกน (Two-Core Coupler) สามแกนแบบอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler) ซึ่งแทนด้วยระบบสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในที่นี้คือระบบสมการชเรอดิงเงอร์แบบไม่เชิงเส้นที่คัปปลิงกัน (Coupled Nonlinear Schrödinger Equation, CNLS) ด้วยการใช้วิธีทางตัวเลข (Numerical Method) ที่เรียกว่าเมธอดออฟไลน์ (Method Of Line, MOL) โดยพิจารณาที่ความยาวคัปเปิลอร์ (Coupler Length, L_c) ที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบีต (Half-Beat-Length) และโดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราขยาย (Gain) การกระจายของเกน (Gain Dispersion) และการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation) คำตอบที่ได้โดยเฉพาะค่าการส่งผ่านสัญญาณ (Transmission) ที่ได้ถูกนำไปใช้พิจารณาในการเลือกพารามิเตอร์ในการออกแบบอุปกรณ์ทางแสง สำหรับการสื่อสารความเร็วสูงโดยเฉพาะ อุปกรณ์กรองสัญญาณทางแสง และ อุปกรณ์สวิตทางแสง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการทางตัวเลข เมธอดออฟไลน์ (Method Of Line, MOL) ในการแก้ระบบสมการชเรอดิงเงอร์แบบไม่เชิงเส้นที่คัปปลิงกัน (Coupled Nonlinear Schrödinger Equation, CNLS) ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนตัวของโซลิตอนในคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงที่โคปด้วยเออร์เบียม (Erbium-Doped Optical Fiber Coupler) ชนิดสองแกน (Two-Core Coupler) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และชนิดสามแกนสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler)

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอนในคัปเปิลอร์ ที่โคปด้วยเออร์เบียมทั้งชนิดสองแกน (Two-Core Coupler) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler)

1.2.3 เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของโซลิตอนสวิตซิง (Soliton Switching) ในคัปเปิลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมทั้งชนิดสองแกน (Two-Core Coupler) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาวิธีการทางตัวเลขเมธอดออฟไลน์ (Method Of Line, MOL) ในการแก้ระบบสมการชเรอดิงเงอร์แบบไม่เชิงเส้นที่คัปปลิงกัน (Coupled Nonlinear Schrodinger Equation, CNLS) ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนตัวของโซลิตอนในคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงที่โคปด้วยเออร์เบียม (Erbium-Doped Optical Fiber Coupler) ชนิดสองแกน (Two-Core Coupler) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และชนิดสามแกนสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler)

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอนในคัปเปิลอร์ ที่โคปด้วยเออร์เบียมทั้งชนิดสองแกน (Two-Core Coupler) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler)

1.3.3 ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองของโซลิตอนสวิตซิง (Soliton Switching) ในคัปเปิลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมทั้งชนิดสองแกน (Two-Core Coupler) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler) ที่มีผลต่อคุณสมบัติการสวิตโซลิตอน โดยเฉพาะค่าอัตราขยาย (Gain) การกระจายของเกน (Gain Dispersion) และการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation)

1.4 การดำเนินงานวิจัย

เริ่มด้วยการศึกษาวิธีการทางตัวเลขแบบต่างๆและหลักการ โซลิตอนและการประยุกต์ใช้งาน พร้อมทั้งระบบสมการที่อธิบายการเคลื่อนตัวของโซลิตอนที่มีการคัปปลิงกัน ซึ่งเป็นระบบสมการที่ใช้ในการอธิบายลักษณะของอุปกรณ์คัปเปลอร์โคปด้วยเออร์เบียมทั้งชนิด 2 และ 3 แกน ในที่นี้เลือกในวิธีการเมธอดออฟไลน์ (Method Of Lines, MOL) ในการแก้ระบบสมการ โซลิตอนที่คัปปลิง โดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยเลือกใช้โปรแกรมเมทแลบ (Matlab) ทำการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้นำไปใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาและพิจารณาออกแบบอุปกรณ์ทางแสงในการสื่อสารความเร็วสูงต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.5.1 ได้ทราบถึงเทคนิคการแก้สมการอนุพันธ์ย่อยโดยระเบียบวิธีทางตัวเลข
- 1.5.2 ได้ทราบถึงหลักการและการใช้งาน โซลิตอน
- 1.5.3 ได้ทราบถึงการประยุกต์ใช้งานคัปเปลอร์สำหรับการสื่อสารความเร็วสูง
- 1.5.4 ได้ทราบคุณสมบัติของอุปกรณ์ทางแสงและหลักการออกแบบเครื่องมือจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ในอันที่จะเป็นข้อมูลและพัฒนาออกแบบอุปกรณ์ต่อไปในอนาคต

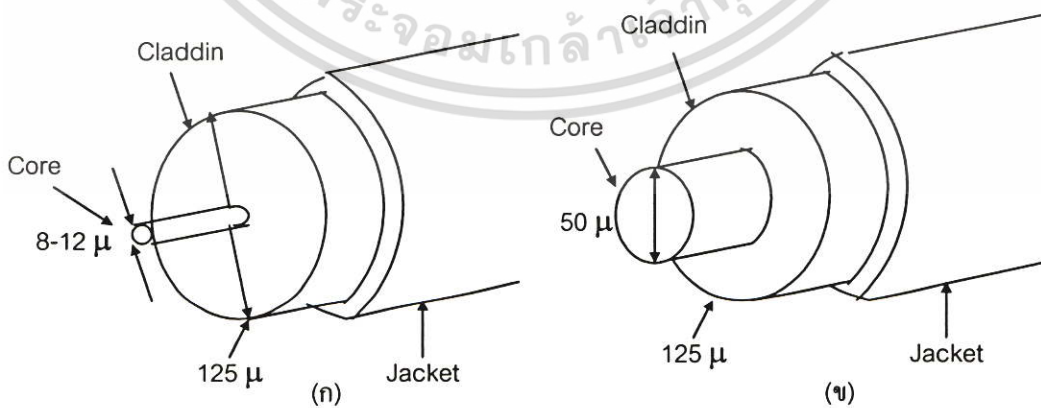
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในระบบการสื่อสารทางแสงโดยใช้พัลส์ของสัญญาณเชิงเส้น ค่าของอัตราการส่งข้อมูล (Bite rate) จะถูกจำกัดโดยคุณลักษณะการกระจาย (Dispersion) ของแสงในใยแก้ว เพื่อเป็นการชดเชยผลที่วุ่นวายนี้โดยการใช้ลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง (Nonlinearity) หลังทำการชดเชยผลที่ได้คือจะได้พัลส์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Pulse) ที่มีความเสถียรและเคลื่อนที่ได้โดยพัลส์นั้นไม่เปลี่ยนรูปร่างซึ่งถูกเรียกว่า “โซลิตอน” (Solitons) โดยพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนในตัวในใยแก้วนำแสงจะถูกอธิบายได้ด้วยสมการชเรอดิงเงอร์แบบไม่เชิงเส้น หรือ สมการโซลิตอน การศึกษาและการวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาแบบจำลองของโซลิตอนสวิตชิงในคัปเปิลเลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียม ทั้งชนิดแบบสองแกน ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ และชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งแทนด้วยระบบสมการทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้คือระบบสมการ ชเรอดิงเงอร์แบบไม่เชิงเส้นที่คัปปลิงกันด้วยการใช้วิธีทางตัวเลข (Numerical Method) และการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง สามารถนำผลที่ได้ไปออกแบบอุปกรณ์ทางแสงความเร็วสูงได้ ในบทนี้จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังกล่าว

2.1 คุณสมบัติของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนที่เป็นแกน (Core) และส่วนที่เป็นชั้นหุ้มแกนหรือเคลดดิ้ง (Cladding) โดยมีค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันเพื่อให้แสงสามารถเดินทางภายในแกนได้ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเส้นใยนำแสง

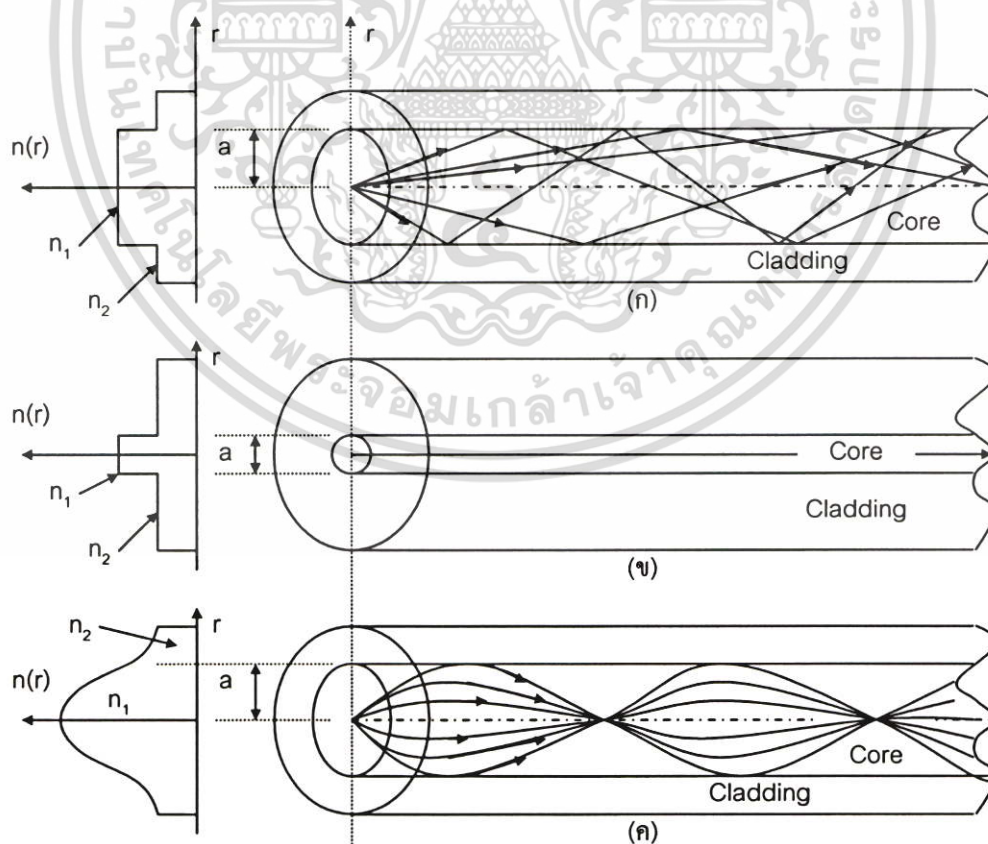
จากรูปที่ 2.1 นั้นเส้นใยนำแสงมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก โดยในรูป 2.1 (ก) เป็นเส้นใยนำแสงชนิดโหมคเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและเคลดคดิงประมาณ 8 ถึง 12 ไมโครเมตร และ 125 ไมโครเมตรตามลำดับ และมีเปลือกหุ้มภายนอก (Jacket) เพื่อความแข็งแรง อีกหนึ่งชั้น ส่วนรูป 2.1 (ข) เป็นชนิดหลายโหมค มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนและเคลดคดิงประมาณ 50 ไมโครเมตร และ 125 ไมโครเมตรตามลำดับ

2.1.1 ชนิดของเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงที่ใช้งานโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือแบ่งตามโหมคการเดินทางของแสง (Propagation mode) วัสดุที่ใช้และโครงสร้าง โดยในส่วนของโหมคการเดินทางของแสงนั้นสามารถแบ่งย่อย ๆ ได้อีกดังนี้

- 1) เส้นใยนำแสงโหมคเดี่ยว (Single-mode fiber, SM)
- 2) เส้นใยนำแสงหลายโหมค (Multimode fiber, MM)
 - 2.1) เส้นใยนำแสงดัชนีชั้นหลายโหมค (Multimode step index fiber, SI)
 - 2.2) เส้นใยนำแสงดัชนีเกรดหลายโหมค (Multimode graded index fiber, GI)

ซึ่งสามารถแสดงประเภทของเส้นใยนำแสงได้ดังรูปที่ 2.2



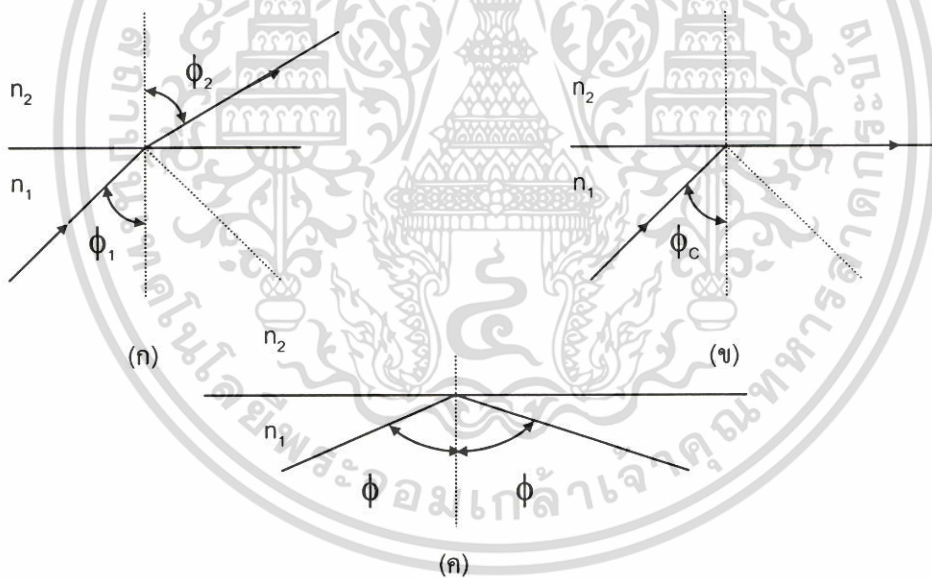
รูปที่ 2.2 แสดงประเภทของเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 2.2 จะมีดัชนีหักเหของแกนและแกลดดิ้งเป็น n_1 และ n_2 ตามลำดับ ซึ่งรอยต่อของค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงในรูปแบบต่าง ๆ กันเป็นฟังก์ชัน $n(r)$ ดังรูป โดยมีรัศมีของเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวแกน r เป็น a ในรูป 2.2 (ก) เป็นชนิดดัชนีชั้นหลายโหมค รูป 2.2 (ข) เป็นชนิดโหมคเดี่ยว และรูป 2.2 (ค) เป็นชนิดดัชนีเกรดหลายโหมค จะเห็นได้ว่า ลำแสงที่เดินทางในเส้นใยหลายโหมคจะมีหลายลำแสงสะท้อนไปมาภายในแกน และออกจากเส้นใยหลายลำแสงหรือมีหลายโหมคในเส้นใยนำแสง ส่วนลำแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงโหมคเดี่ยว จะออกจากเส้นใยนำแสงเดี่ยวหรือมีโหมคเดี่ยว

โดยทั่วไปเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก (Plastic optical fibers, POF) จะเป็นเส้นใยนำแสงดัชนีชั้นหลายโหมค วัสดุที่นำมาทำในส่วนแกนจะต้องโปร่งใสในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน ซึ่งมักใช้วัสดุประเภทอมอร์ฟัสโพลีเมอร์ (Amorphous-polymers)

2.1.2 การแพร่กระจายของแสงในเส้นใยนำแสง

การเดินทางของแสงจะอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดภายในแกน ซึ่งอาศัยกฎของสเนลล์ (Snell's law) การหักเห และการสะท้อนของแสงแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการหักเหและการสะท้อนของแสงในกรณี $n_1 > n_2$

จากรูปที่ 2.3 ในรูป 2.3 (ก) นั้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่หนึ่งที่มีดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่สองที่มีดัชนีหักเห n_2 โดยมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อน ϕ_1 และ ϕ_2 ตามลำดับ เป็นไปตามกฎของสเนลล์ดังนี้

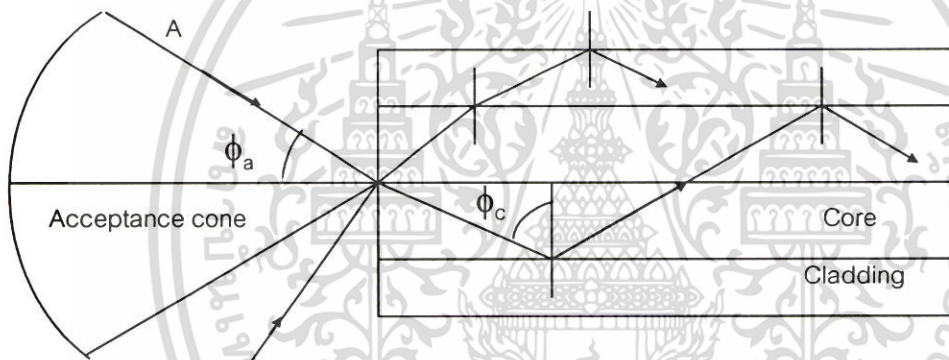
$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.1)$$

และในรูป 2.3 (ข) เมื่อมุมตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤต จะทำให้แสงเกิดการสะท้อนกลับหมดหรือไม่มีแสงเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่สอง และตามรูป 2.3 (ค) นั้นเมื่อมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤตจะทำให้แสงเดินทางสะท้อนกลับมายังตัวกลางที่หนึ่ง ซึ่งเส้นใยนำแสงใช้หลักการนี้ในการทำให้แสงเดินทางภายในแกนโดยกำหนดให้ค่าดัชนีหักเหของแกน (n_{Core}) นั้นมีค่ามากกว่าค่าดัชนีหักเหของเคลดดิ้ง (n_{Cladding}) เพื่อทำให้แสงสะท้อนอยู่ภายใน โดยสามารถหามุมวิกฤต (Critical angle) ได้ดังนี้

$$\phi_c = \sin^{-1}(n_{\text{Cladding}}/n_{\text{Core}}) \quad (2.2)$$

2.1.3 นิวเมอริคัลอะเพอเจอร์ (Numerical aperture, NA)

ในการส่งลำแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง ถ้าต้องการให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณามุมที่ทำการส่งลำแสงเข้าเส้นใยนำแสงด้วย ซึ่งพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงมุมการรับแสงตกกระทบของเส้นใยนำแสง

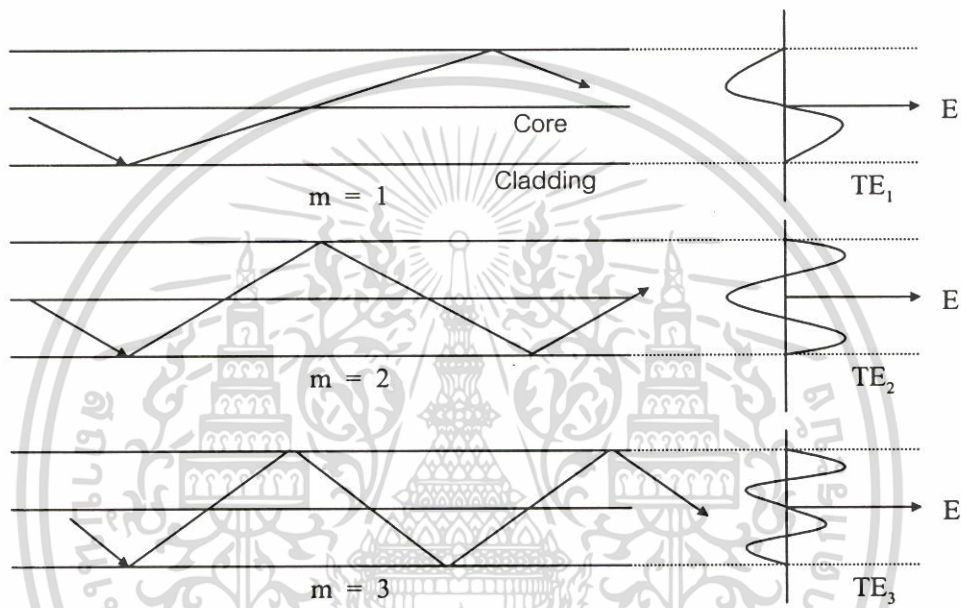
จากรูปที่ 2.4 นั้นมุม ϕ_a เป็นช่วงของมุมที่รับแสงตกกระทบได้แล้วจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในหรือในช่วงของมุมที่รังสี A ตกกระทบกับเส้นใยนำแสงเรียกว่ากรวยแสงที่ยอมรับได้ (Acceptance cone) ถ้าแสงทำมุมมากกว่าค่านี้หรือตามรังสี B จะทำให้แสงเดินทางภายในเส้นใยนำแสงโดยมีมุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต ϕ_c จะทำให้เกิดการรั่วไหลของแสงออกไปจากเส้นใยนำแสงจนหมดไปในที่สุด ทำให้แสงไม่สามารถเดินทางภายในเส้นใยนำแสงไปเป็นระยะทางไกล ๆ ได้ มีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับมุมนี้คือ นิวเมอริคัลอะเพอเจอร์ซึ่งหาได้ดังนี้

$$NA = n_0 \sin \phi_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (2.3)$$

เมื่อ $\Delta \approx (n_1 - n_2) / n_1$ โดยที่ n_0 , n_1 และ n_2 เป็นดัชนีหักเหของอากาศ แกนและเคลดคิงตามลำดับ พารามิเตอร์นี้จะบ่งบอกค่ามุมตกกระทบสูงสุด และนำมาใช้ศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงและคำนวณหาค่ากำลังแสงที่ป้อนเข้าสู่เส้นใยนำแสง

2.1.4 โหมดของแสงในเส้นใยนำแสง

การแพร่กระจายของแสงในเส้นใยนำแสง จะถูกบังคับด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งสามารถบอกถึงจำนวนแน่นอนของโหมด เมื่อพิจารณาที่หน้าแสงอย่างง่ายแบบระนาบดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโหมดของสนามไฟฟ้าในตัวนำแบบระนาบ

จากรูปที่ 2.5 จะพบว่าสามารถเกิดกลุ่มของสนามไฟฟ้าได้หลายรูปแบบ ซึ่งแปรผันตามฮาร์โมนิก โดยแต่ละรูปแบบจะแทนโหมดของสนามไฟฟ้าและจำนวนลำดับของโหมดจะเท่ากับจำนวนครั้งที่สนามไฟฟ้าตามขวางมีค่าเป็นศูนย์หรือ $E_z = 0$ ในรูปนั้นแสดงถึงโหมดของสนามไฟฟ้า (Transverse electric) หรือ TE_m โหมด เมื่อ m คือจำนวนเต็ม แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะสนามแม่เหล็กก็จะเป็นโหมดของสนามแม่เหล็ก (Transverse magnetic) หรือ TH_m โหมด แต่ถ้าพิจารณารวมทั้งสองสนามก็จะเป็นโหมดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Transverse electromagnetic) หรือ TEM โหมด ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดในตัวนำพวกโลหะเช่น สายเคเบิลโลหะ แต่เกิดน้อยในเส้นใยแก้วนำแสง ถ้าพิจารณาเป็นตัวนำแบบทรงกระบอกก็จะเป็นโหมด TE_{lm} หรือ TH_{lm} เมื่อ l และ m คือจำนวนเต็มถ้าผลของโหมคนั้นเกิดจากรังสีของแสงที่เดินทางเป็นเกลียวภายในแกนก็จะเกิดโหมดไฮบริดจ์ (Hybrid modes) คือ HE_{lm} หรือ EH_{lm} ขึ้นอยู่ว่าส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการกระจายสนามในแนวตามขวางมากกว่ากัน นอกจากนี้โหมดยัง

สัมพันธ์กับมุมของแสงตกกระทบบนรอยต่อของแกนและแคลคดิง ซึ่งเส้นใยนำแสงที่เป็นทรงกระบอกถ้าพิจารณาในแนวตัวขวางก็จะพิจารณาได้เหมือนกับตัวนำแบบระนาบ สำหรับท่อนำแสงแบบทรงกระบอกที่มีความสม่ำเสมอของเนื้อสาร (Cylindrical homogeneous) จะมีสมการคลื่นที่เคลื่อนที่ดังนี้

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2\psi}{d\phi^2} + (n_1^2 k^2 - \beta^2) \psi = 0 \quad (2.4)$$

เมื่อ ψ คือเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก n_1 คือดัชนีหักเหของแกนเส้นใยนำแสง k คือค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ของแสงในสุญญากาศ r และ ϕ คือพิกัดทรงกระบอก และค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ของตัวนำ β จะต้องอยู่ในช่วงดังนี้

$$n_2 k < \beta < n_1 k \quad (2.5)$$

n_2 คือดัชนีหักเหของแคลคดิงเส้นใยนำแสง ซึ่งคำตอบของสมการ (2.4) เป็นดังนี้

$$\psi = E(r) \left\{ \begin{array}{l} \cos l\phi \\ \sin l\phi \end{array} \exp(\omega t - \beta z) \right\} \quad (2.6)$$

$E(r)$ คือฟังก์ชันของสนามไฟฟ้า l คือจำนวนเต็มที่ยกจำนวนโหมดที่เกิดขึ้น ω คือความถี่เชิงมุม t คือเวลา นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือค่าของ V (V -number) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับนิวเมอริกัลอะเพอเจอร์ดังนี้

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(NA) = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (2.7)$$

λ คือความยาวคลื่นแสงที่เดินทางในแกน a คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน สมการ (2.7) จะใช้พิจารณาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเส้นใยนำแสงและค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้งาน และใช้ในการพิจารณาเพื่อผลิตเส้นใยนำแสงชนิดต่าง)

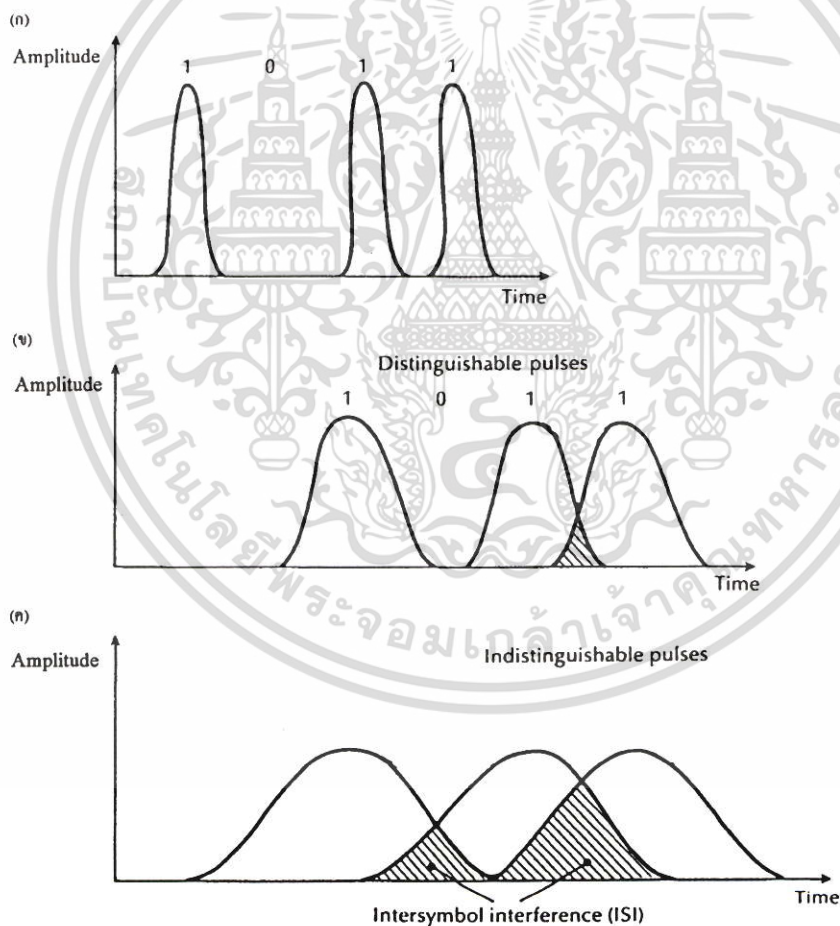
2.1.5 การกระจาย (Dispersion)

การกระจายเป็นการขยายกว้างออก (Broadening หรือ Distortion) ของสัญญาณแสง (Optical signal) ที่เดินทางในใยแก้วนำแสงกล่าวคือ เมื่อป้อนแสงที่เป็นพัลส์ (Light pulses) เข้าที่ปลายข้างหนึ่งของใยแก้วนำแสง แสงที่ออกจากปลายอีกข้างจะมีความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้นจากเดิม

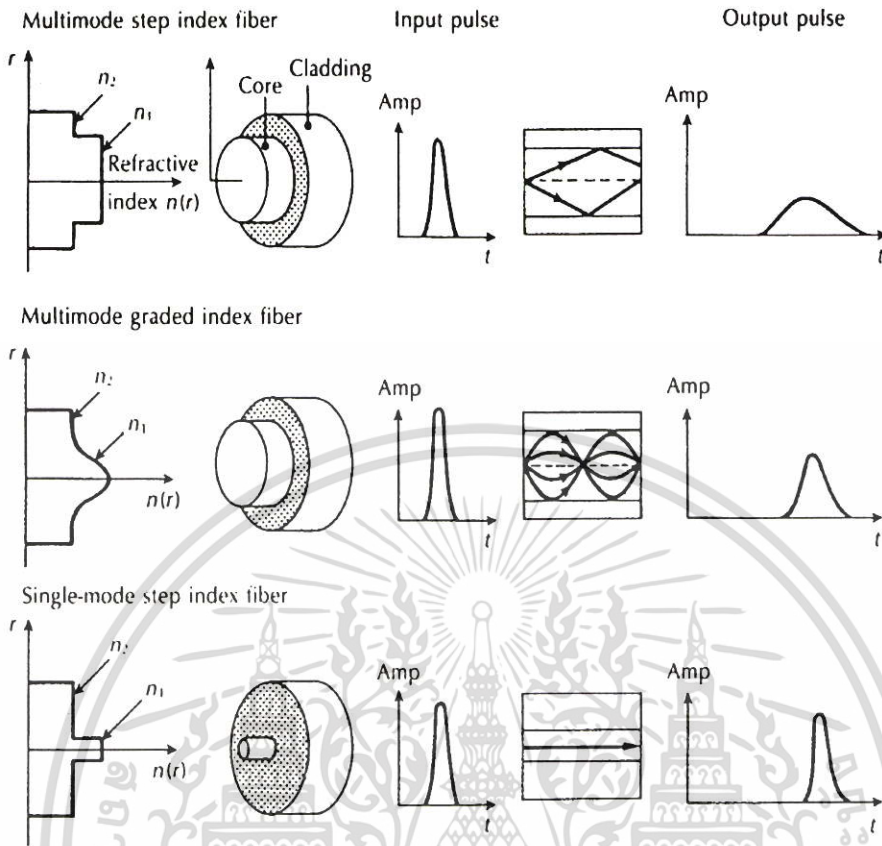
เมื่อส่งสัญญาณ 1101 รูปพัลส์เดินทางในใยแก้วนำแสงดังรูปที่ 2.6 (ก) จากผลของการกระจายทำให้ความกว้างของพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.6 (ข) พัลส์จะเกิดการซ้อนกัน (Overlaps) กับพัลส์ข้างเคียงเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณ (Intersymbol interference : ISI) ทำให้พัลส์ที่ออก

จากใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นพัลส์ที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ (Indistinguishable pulses) ดังรูปที่ 2.6 (ค)

จากคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ ใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์และใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ ขนาดของแกนกับแคลดดิ้งของใยแก้วนำแสงแต่ละชนิดและจำนวนโหมดของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง ซึ่งทั้งหมดจะมีผลต่อการเกิดการกระจายของสัญญาณแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง จะพบว่าสัญญาณแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์จะมีการกระจายของสัญญาณแสงน้อยที่สุด ส่วนใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์จะทำให้เกิดการกระจายของสัญญาณแสงมากที่สุดดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณและพัลส์ที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ เนื่องจากการกระจายของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง



รูปที่ 2.7 การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากใยแก้วนำแสงชนิดต่างๆ

การกระจายแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ การกระจายเชิงความยาวคลื่นและการกระจายเชิงโหมด

2.1.5.1 การกระจายเชิงความยาวคลื่น (Wavelength Dispersion หรือ Chromatic Dispersion หรือ Intramodal Dispersion)

การกระจายเชิงความยาวคลื่นเกิดขึ้นกับใยแก้วนำแสงทุกชนิด เนื่องจากความยาวคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้มีลักษณะเป็นแถบกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่น (Wavelength spectrum width) คือให้แสงที่มีหลายความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ทำให้แสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงมีความเร็วต่างกัน ผลคือเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางมาถึงปลายใยแก้วนำแสงจะต่างกัน เกิดการล่าช้าทางเวลา (Time delay) หรือการกว้างออกของพัลส์ (Pulse broadening) ขึ้น การกระจายเชิงความยาวคลื่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ การกระจายเชิงวัสดุและการกระจายเชิงท่อนำคลื่น

1 การกระจายเชิงวัสดุ (Material Dispersion)

การกระจายเชิงวัสดุเกิดขึ้นเนื่องจากค่าดัชนีหักเหของแกนมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางผ่าน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.8)

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda f}{v} \quad (2.8)$$

ถ้าแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงเช่น LED หรือ LD มีความยาวคลื่นไม่คงที่ค่าเดียว แต่เป็นแถบกว้างของสเปกตรัมความยาวคลื่น (มีหลายความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน) ดังนั้นถ้าความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงเปลี่ยน ค่าดัชนีหักเหของแกนก็จะเปลี่ยนตามทำให้ความเร็วของแสงในแต่ละความยาวคลื่นมีค่าไม่เท่ากัน แสงที่เดินทางไปถึงปลายใยแก้วนำแสงจะใช้เวลาต่างกัน การกระจายเชิงวัสดุหาได้ดังนี้

ให้การล่าช้าทางเวลา (Time delay : t_M) ที่เกิดจากการกระจายเชิงวัสดุของพัลส์ที่เดินทางในใยแก้วนำแสงความยาว L คือ

$$t_M = \frac{L}{c} \left(n_{\text{Core}} - \lambda \frac{dn_{\text{Core}}}{d\lambda} \right) \quad (2.9)$$

ถ้าแหล่งกำเนิดแสงให้แสงที่มีความกว้างสเปกตรัม (Spectral width) เท่ากับ σ_λ และ ความยาวคลื่นกลาง (Central wavelength : λ) ดังนั้นการกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากการกระจายเชิงวัสดุ (σ_M) คือ

$$\sigma_M \approx \sigma_\lambda \left(\frac{dt_M}{d\lambda} \right) \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.9) หาอนุพันธ์ของ t_M เทียบกับ λ ได้

$$\frac{dt_M}{d\lambda} = - \left(\frac{L\lambda}{c} \right) \left(\frac{d^2 n_{\text{Core}}}{d\lambda^2} \right) \quad (2.11)$$

แทนสมการที่ (2.11) ลงในสมการที่ (2.10) จะได้การกว้างออกของพัลส์ที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของแกนเทียบกับความยาวคลื่นของแสง คือ

$$\sigma_M \approx \frac{\sigma_\lambda L}{c} \left| \lambda \frac{d^2 n_{\text{Core}}}{d\lambda^2} \right| \quad (2.12)$$

นอกจากนี้การกระจายเชิงวัสดุยังรวมไปถึงกรณีการกระจายความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion, GVD) ซึ่งจะอธิบายไว้ในตอนท้าย

2 การกระจายเชิงท่อนำคลื่น (Waveguide dispersion) หรือการกระจาย

เชิงโครงสร้าง (Structure dispersion)

การกระจายเชิงท่อนำคลื่นเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของใยแก้วนำแสงเช่น ใยแก้วนำแสงที่มีค่าผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ (Δ) น้อย ทำให้เมื่อแสงตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิ้งจะมีแสงส่วนหนึ่งหักเหเข้าไปในแคลดดิ้งทำให้ทางเดินของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นผลคือ

ระยะทางที่แสงเดินทางได้จะต่างกันทำให้เวลาที่แสงใช้ในการเดินทางในใยแก้วนำแสงไม่เท่ากัน เกิดการล่าช้าทางเวลาขึ้น สำหรับการกว้างออกของพัลส์ที่เกิดจากการกระจายเชิงท่อนำคลื่น (σ_w) หาได้จากสมการที่ (2.13)

$$\sigma_w \approx \frac{\sigma_\lambda L}{c} \left| \lambda \frac{d^2 n_{\text{Eff}}}{d\lambda^2} \right| \quad (2.13)$$

เมื่อ n_{Eff} คือ ค่าดัชนีหักเหเชิงผล (Effective refractive index) มีค่าเท่ากับ $n_{\text{Core}} \sin(\theta_i)$ โดยที่

$$\theta_c < \theta_i < 90^\circ$$

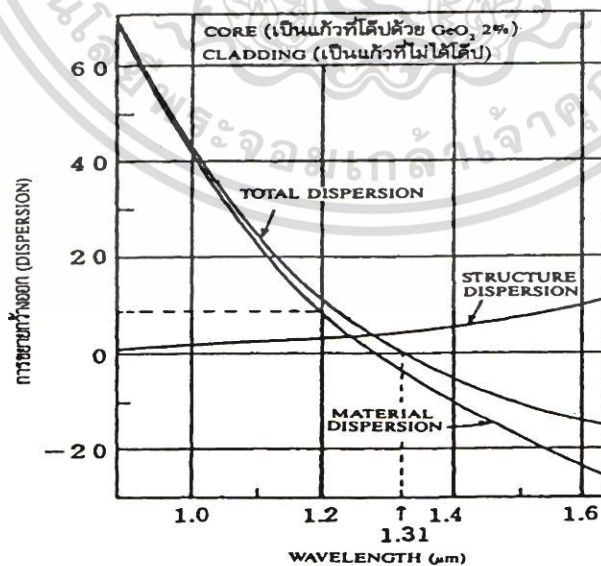
และ

$$n_{\text{Cladding}} < n_{\text{Eff}} < n_{\text{Core}}$$

โดยทั่วไปถ้าความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงมีค่ามาก จะทำให้อัตราการหักเหของแสงเข้าไปในแคลคดิ่งมีค่ามากขึ้นด้วย

เนื่องจากการกระจายเชิงวัสดุและการกระจายเชิงท่อนำคลื่นต่างกันอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสง ดังนั้นเรียกการกระจายทั้งสองรวมกันว่า การกระจายเชิงความยาวคลื่น (Wavelength Dispersion หรือ Chromatic Dispersion)

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าถ้าให้แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ $1.31 \mu\text{m}$ เดินทางในใยแก้วนำแสง จะทำให้การกระจายเชิงวัสดุและการกระจายเชิงท่อนำคลื่นหักล้างกันหมด ผลคือการกระจายเชิงความยาวคลื่นมีค่าเป็น 0 นั่นหมายความว่า จะไม่มีการขยายกว้างออกของสัญญาณแสง เรียกความยาวคลื่นนี้ว่า ความยาวคลื่นซีโรดิสเพอร์ชัน (Zero Dispersion Wavelength)



รูปที่ 2.8 การกระจายเชิงความยาวคลื่นที่เกิดในใยแก้วนำแสงชนิดสเต็ปอินเด็กซ์

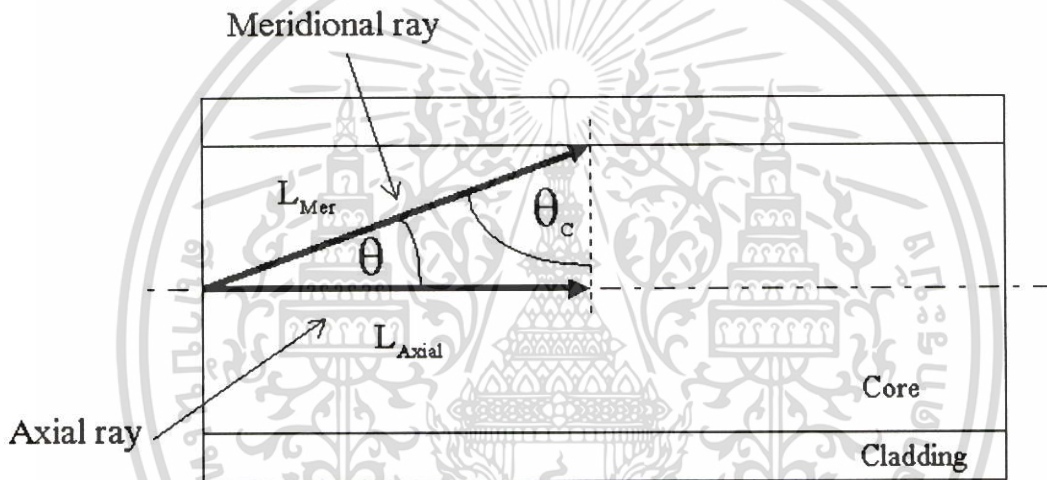
2.1.5.2 การกระจายเชิงโหมด (Mode Dispersion หรือ Intermodal Dispersion)

การกระจายเชิงโหมดเกิดขึ้นเฉพาะในใยแก้วนำแสงหลายโหมด เนื่องจากโหมดต่างๆ ของแสงที่เดินทางในใยแก้วนำแสงมีเส้นทางการเดินทางที่ต่างกัน ทำให้เวลาที่ใช้ในการเดินทางมาถึงปลายใยแก้วนำแสงต่างกันด้วย จึงเกิดการล่าช้าทางเวลาหรือการกว้างออกของพัลส์ขึ้น

การกระจายเชิงโหมดจะไม่ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ แต่จะขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของใยแก้วนำแสง สำหรับใยแก้วนำแสงโหมดเดียวจึงไม่เกิดการกระจายเชิงโหมด

1 การกระจายเชิงโหมดในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเดกซ์

พิจารณาทางเดินของแสงทั้งสองเส้นทางคือ รังสีตามแกน (Axial ray) และรังสีเมอริเดียน (Meridional ray) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงทางเดินของรังสีตามแกนและรังสีเมอริเดียนในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเดกซ์

จากรูปที่ 2.9 ระยะทางที่รังสีตามแกนเดินทางได้จะเท่ากับความยาวของใยแก้วนำแสง (L)

$$L_{\text{Axial}} = L \quad (2.14)$$

ระยะทางที่รังสีเมอริเดียนเดินทางได้ หาได้จากกฎของสเนลล์

$$\sin(\theta_c) = \frac{L_{\text{Axial}}}{L_{\text{Mer}}} = \frac{n_{\text{Cladding}}}{n_{\text{Core}}} \\ L_{\text{Mer}} = L_{\text{Axial}} \left(\frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} \right) = L \left(\frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} \right) \quad (2.15)$$

ดังนั้นผลต่างทางเดิน (Total path length difference) ของแสงทั้งสองเส้นทาง คือ

$$\delta L = L_{\text{Mer}} - L_{\text{Axial}} = L \left(\frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} - 1 \right) \quad (2.16)$$

เนื่องจากแสงทั้งสองเดินทางด้วยความเร็วเท่ากัน (ในแกนของใยแก้วนำแสงเดียวกัน) แต่เดินทางได้ระยะทางต่างกัน แสดงว่าแสงทั้งสองใช้เวลาในการเดินทางไปถึงปลายใยแก้วนำแสงต่างกัน

ดังนั้น เวลาที่แสงทั้งสองใช้ต่างกัน (Time delay) คือ

$$\begin{aligned} \delta t_s &= \frac{\delta L}{v} = \left(\frac{n_{\text{Core}} L}{c} \right) \left(\frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Cladding}}} - 1 \right) \\ &= \left(\frac{n_{\text{Core}} L}{c} \right) \left(\frac{\Delta}{1 - \Delta} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

หรือ

$$\delta t_s \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta}{c} \approx \frac{L (NA)^2}{2 n_{\text{Core}} c} \quad (2.18)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในแกน

Δ คือ ผลต่างค่าดัชนีหักเหสัมพัทธ์ของใยแก้วนำแสง ($\Delta \ll 1$)

NA คือ นิวเมอร์ริคัลอะเพอร์เจอร์ของใยแก้วนำแสง

การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (σ_s) หาได้จากสมการ

$$\sigma_s \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta}{20c\sqrt{3}} \approx \frac{L (NA)^2}{n_{\text{Core}} c 4\sqrt{3}} \quad (2.19)$$

2 การกระจายเชิงโหนดในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์

เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์มีค่าลดลงตามแนวรัศมีหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} n(r) &= n_{\text{Core}} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2}, \quad r < a \text{ (Core)} \\ &= n_{\text{Core}} \sqrt{1 - 2\Delta} = n_{\text{Cladding}}, \quad r \geq a \text{ (Cladding)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ดังนั้นการล่าช้าทางเวลาที่เกิดจากโหมดต่างๆ ของแสงที่เดินทางไปถึงปลายใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์คือ

$$\delta t_g \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta^2}{2c} \approx \frac{(NA)^4}{8 n_{\text{Core}}^3 c} \quad (2.21)$$

การกว้างออกของพัลส์ที่เกิดในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (σ_g) หาได้จากสมการที่ (2.22)

$$\sigma_g \approx \frac{n_{\text{Core}} L \Delta^2}{20c\sqrt{3}} \quad (2.22)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการกว้างออกของพัลส์ที่เกิดขึ้นในใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดสตีปอินเด็กซ์และใยแก้วนำแสงหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ คือ

$$\sigma_g = \frac{\Delta}{D} \sigma_s \quad (2.23)$$

เมื่อ D คือ ค่าคงที่มีค่าอยู่ระหว่าง 4-10 ซึ่งขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการคำนวณ

2.1.5.3 การกระจายทั้งหมดในใยแก้วนำแสงหลายโหมด

(Overall dispersion in Multimode fibers)

การกระจายทั้งหมดของพัลส์ (σ_T) ที่เดินทางในใยแก้วนำแสงหลายโหมด หาได้ดังสมการที่ (2.24)

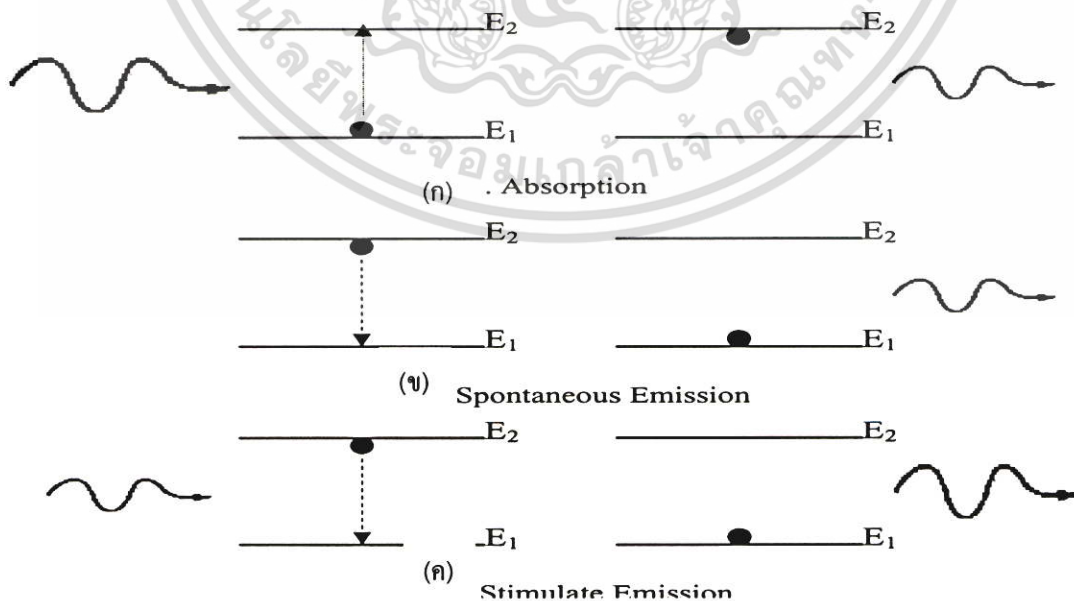
$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_W^2 + \sigma_{\text{Mode}}^2} \quad (2.24)$$

เมื่อ σ_{Mode} (Mode dispersion) \gg σ_M (Material dispersion) $>$ σ_W (Waveguide dispersion)

2.2 การขยายสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Amplifiers)

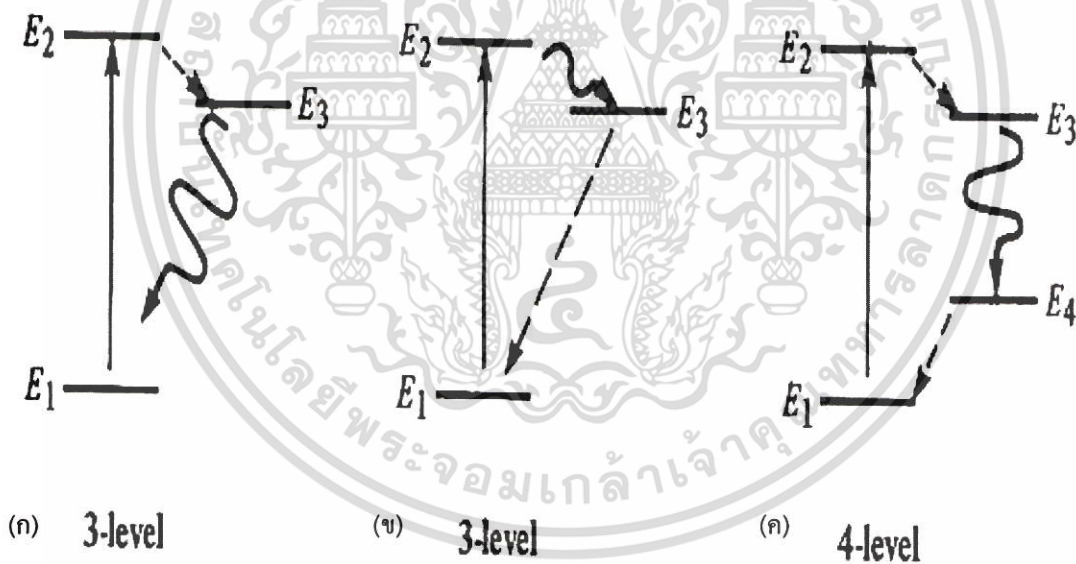
2.2.1 หลักการทำงานของเลเซอร์

เลเซอร์ (LASER) ย่อมาจาก คำว่า "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" คือ กระบวนการกระตุ้นให้เกิดการแผ่รังสี (Stimulated Emission) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดความเข้มแสงเพิ่มขึ้น (Light Amplification)



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของแสงกับวัตถุเมื่อมีการดูดกลืนแสงและการแผ่รังสีแสง

จากรูปที่ 2.10 แสดงถึงกระบวนการพื้นฐานของการดูดกลืนแสง และการการแผ่รังสีแสง รูป 2.10(ก) แสดงพลังงานของแสงเท่ากับพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างระดับ E_1 และ E_2 เรโซแนนซ์โฟตอน จะถูกดูดกลืน(Absorption) ทำให้สารนั้นสู่ภาวะกระตุ้น โดยความเข้มของแสงลดลง แต่ความถี่คงเดิม รูป 2.10(ข) เป็นกระบวนการที่เกิดแบบสุ่ม(Random Process) และเป็นกระบวนการทำให้เกิดฟลูออเรสเซนต์โฟตอน(Fluorescent Photon) เรียกว่ากระบวนการแผ่คลื่นแบบสะปอนเตเนียส (Spontaneous Emission) และแสงที่เกิดขึ้นแบบนี้เป็นแสงที่ไม่อาพันธ์ (Incoherent) สำหรับ รูป 2.10(ค) เป็นกระบวนการที่ไอส์ไตน์ยอมรับว่า เรโซแนนซ์โฟตอน สามารถเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่สถานะพื้นให้กลายเป็นอะตอมหรือโมเลกุลสู่สถานะกระตุ้นได้ และเรโซแนนซ์โฟตอน ก็จะสามารถเกิดอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่สถานะกระตุ้นให้กลายเป็นอะตอมหรือโมเลกุลสู่สถานะพื้นได้กระบวนการอย่างนี้เรียกว่า กระบวนการกระตุ้นให้เกิดการแผ่รังสี (Stimulation Emission) เป็นขบวนการที่สำคัญในการเกิดแสงเลเซอร์แสง หรือแสงอาพันธ์ (Coherent) จากที่ได้กล่าวมาเป็นการพิจารณาที่เป็นสองระบบพลังงาน (Two -Levels System) ซึ่งยังมีระบบอื่นอีกที่เป็นหลายระดับ (Multi - Level) ซึ่งเรียกว่าการปั๊ม (Pumping) แสดงได้ดังรูป 2.11 ซึ่งจะให้เลเซอร์อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.11 แสดงการปั๊มแบบหลายระดับ

เส้นทึบแสดงการเปลี่ยนระดับพลังงานจากการปั๊ม(Pump Transition) เส้นประแสดงการสลายตัว (Decay) โดยไม่ให้แสงหรือรังสี เส้นคดๆ แสดงการให้เลเซอร์จากการทรานซิชัน

รูปที่ 2.11(ก) เป็นระบบ 3 ระดับ ซึ่งเป็นระบบที่เรียกว่าเป็นการปั๊มให้เกิดการเปลี่ยนจากระดับ E_1 สู่ E_2 แล้วเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วแบบไม่ให้รังสีไปยัง E_3 ซึ่งมีชีวิตที่ยาวพอสมควร แล้วกลับมาสู่ระดับ E_1 จะให้เลเซอร์ออกมา

รูปที่ 2.11(ข) เป็นระบบ 3 ระดับอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งจัดว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่านั้นคือเกิดทรานซิชันได้เลเซอร์ คือการเปลี่ยนระดับจาก E_2 สู่ E_3 ระบบนี้เกิดได้ง่าย เพราะเริ่มจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่ E_3 ไม่จำเป็นต้องมีเลย ซึ่งต่างจากระบบแรก

รูปที่ 2.11(ค) เป็นระบบ 4 ระดับ ซึ่งจัดว่าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากเพราะ E_4 ไม่ได้อยู่ที่สถานะพื้นและทรานซิชันที่ให้เลเซอร์คือการเปลี่ยนระดับจาก E_3 สู่ E_4 ดังนั้นถ้าจะให้เกิดเลเซอร์ขึ้นมากๆ ก็เพียงแต่ปั๊มให้เกิด E_2 และ E_3 มากๆ เท่านั้น ซึ่งการปั๊มนี้อาจใช้กำลัง ต่ำกว่าระบบ 3 ระดับพลังงาน

2.2.2 อัตราการขยายแสง

การเปล่งแสงที่เกิดจากการเร่งเร็ว (Stimulated Emission) จะส่งผลให้เกิดการขยายแสงไปในตัว เริ่มแรกจะกล่าวถึงกรณีวัสดุทั่วไปซึ่งมีการดูดกลืนแสง ดังรูปที่ 2.12 สมมติว่ามีแสงอินพุตที่มีแอมพลิจูด I_0 วิ่งเข้าสู่วัสดุที่มีความยาว z แสงอินพุตนี้จะถูกวัสดุดูดกลืน ดังนั้นแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุจะมีแอมพลิจูดดังสมการข้างล่าง

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\alpha(\lambda)z} \quad (2.25)$$

โดยที่ I คือ ความเข้มของแสง

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

$\alpha(\lambda)$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุ

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าแสงยังเดินทางระยะทาง (z) ไกลเท่าไร แอมพลิจูดของแสงจะยิ่งลดลง



รูปที่ 2.12 การลดทอนของแสงเนื่องจากถูกวัสดุดูดกลืน

แต่ถ้าแสงวิ่งเข้าสู่วัสดุซึ่งกำลังอยู่ในสภาพประชากรผกผันดังแสดงในรูปที่ 2.13 แสงที่ทะลุออกด้านหลังจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นเป็นดังสมการ

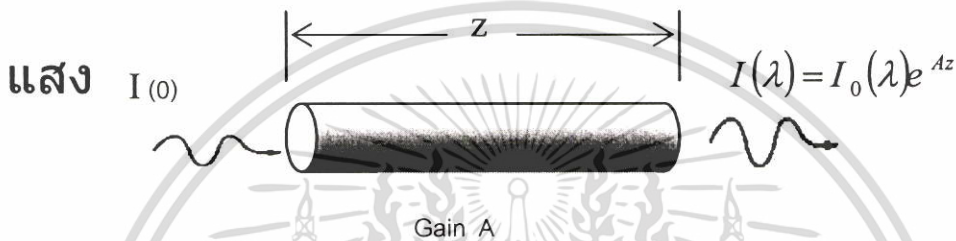
$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{Az} \quad (2.26)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าแสงยิ่งเดินทางไกลมากเท่าไร แอมพลิจูดของแสงก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น สัมประสิทธิ์ A ในสมการนี้เรียกว่า " สัมประสิทธิ์อัตราขยายแสง" (Optical Gain Coefficient)

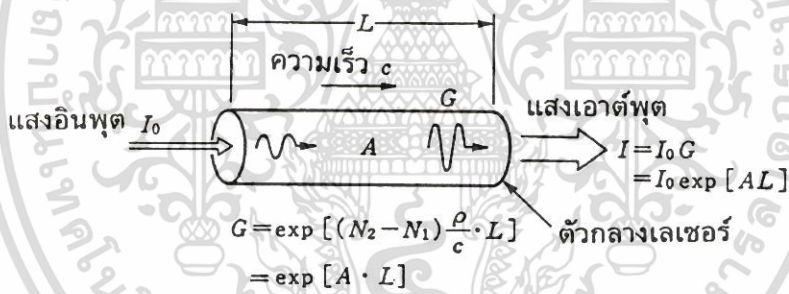
$$A = (N_2 - N_1)\rho / c \quad (2.27)$$

โดยที่ ρ คือ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจาก E_2 ไปสู่ E_1 และ
 c คือ ความเร็วแสง

N_1 และ N_2 คือจำนวนประชากรในระดับพลังงานที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 การขยายขนาดของสัญญาณแสงในวัสดุตัวกลางกำเนิดเลเซอร์



รูปที่ 2.14 วิธีการพิจารณาหาค่าอัตราขยายแสง

จากรูปที่ 2.14 ถ้ามีวัสดุมีความยาว L และถ้าแสงเอาต์พุตมีแอมพลิจูดเท่ากับ I_0G เราเรียก G ว่า "อัตราขยายแสง" มีค่าดังสมการ

$$G = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(AL) = \exp\left[(N_2 - N_1)\frac{\rho}{c} \cdot L\right] \quad (2.28)$$

สมการนี้บอกให้เห็นว่า ถ้าจำนวนประชากรผกผัน $(N_2 - N_1)$ ยิ่งมากและแสงเดินทางในวัสดุนี้ไกลมาก ก็จะได้อัตราขยายแสงมากแบบเอ็กโพเนนเชียล

2.2.3 การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วนำแสงที่โด๊ปด้วยเออร์เบียม

เนื่องจากการสื่อสารผ่านระยะทางไกลๆ เช่น การส่งสัญญาณจากสถานีส่งไปยัง สถานีรับซึ่งจะมีขนาดของสัญญาณลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ขนาดสัญญาณมีค่าสูงพอที่จะให้การแปลงข้อมูลที่เครื่องรับมีได้ จึงต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ติดตั้งระหว่างสถานีรับและส่งตามจำนวนที่จำเป็น แต่เดิมการขยายขนาดของสัญญาณจะดำเนินการ โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะประกอบด้วย การแปลงสัญญาณจากแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปขยายจากนั้นก็ทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสงดั้งเดิมเพื่อส่งกลับเข้าไปในใยแก้วนำแสงต่อไปยังจุดหมายปลายทาง

โดยทั่วไปแล้ววงจรสำหรับขยายสัญญาณในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อจำกัดทางด้านความเร็ว ซึ่งไม่เหมาะสมกับสภาวะการณ์เจริญเติบโตทางด้าน การสื่อสารที่นับวันจะต้องมีการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาระบบการขยายสัญญาณเชิงแสงขึ้นมาแทนเพราะระบบนี้ไม่มีข้อจำกัดในแง่ความจุข้อมูลมาเกี่ยวข้องเหมือนระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบนี้รู้จักกันในนามอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Optical Fiber Amplifier) ซึ่งจะใช้ใยแก้วชนิดเอ็ดคทีฟ จะเป็นเออร์เบียมโด๊ปไฟเบอร์ (EDFA) ดังรูปที่ 2.15 โดยป้อนแสงที่ต้องการขยายความยาวคลื่น 1.5 ไมโครเมตร และใช้เลเซอร์ปั๊มด้วยความยาวคลื่น 1.48 ไมโครเมตร หรือ 0.98 ไมโครเมตร โดยผ่านคัปเปิลเลอร์ สิ่งที่ได้ออกคือสัญญาณขาออกที่ถูกขยายแอมพลิจูดมากขึ้น

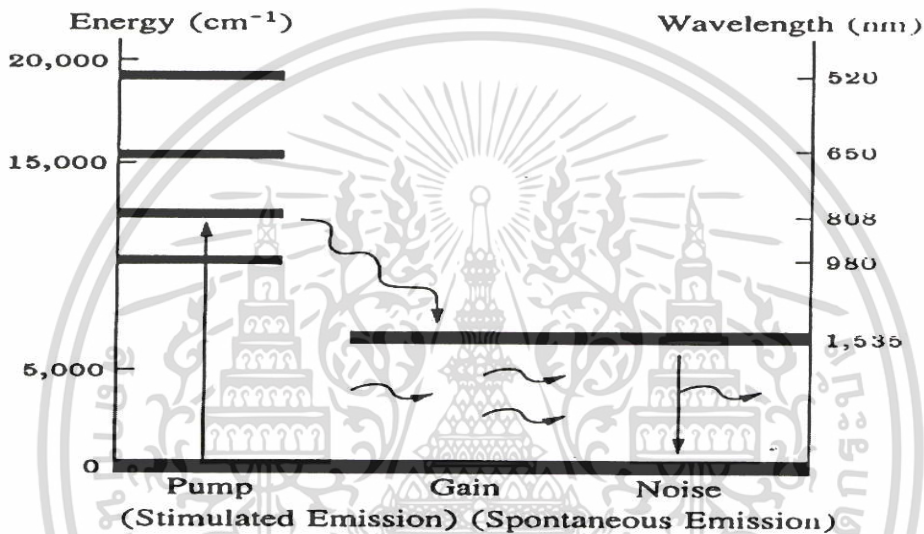


รูปที่ 2.15 แสดงการขยายสัญญาณทางแสง

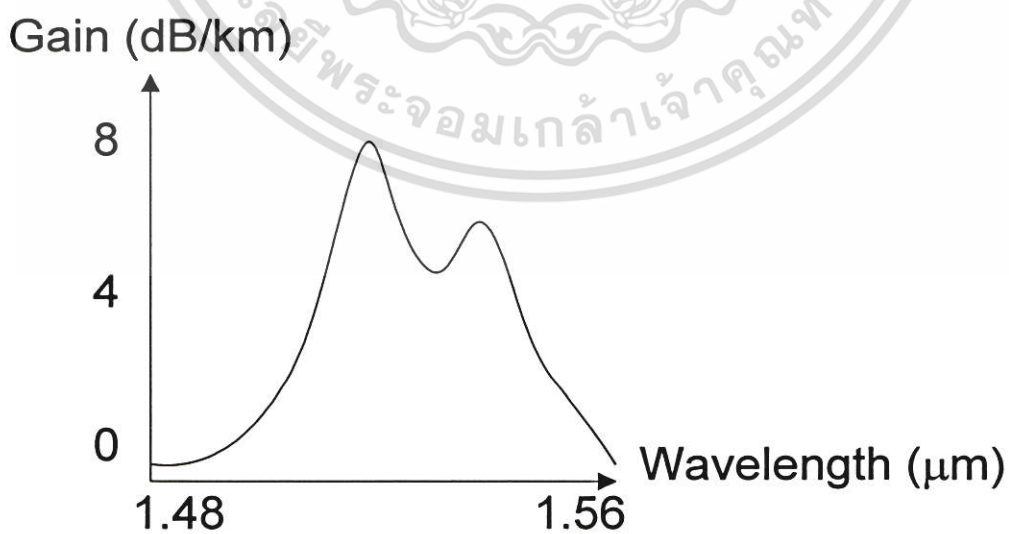
ใยแก้วเออร์เบียมโด๊ป (Erbium Doped Fiber Amplifiers; EDFA) ทำโดยการเติมธาตุในกลุ่มแรเอิร์ท (Rare Earth) คือนีโอไดเมียม (Neodymium) หรือ เออร์เบียม (Erbium) ที่อยู่ในรูปของออกไซด์เข้าไประหว่างขั้นตอนการประดิษฐ์ที่รู้จักกันในเลเซอร์ใยแก้ว (Fiber Laser) ซึ่งทำให้ปัญหาที่เคยมีกับตัวขยายสัญญาณแบบสารกึ่งตัวนำหมดไป การเติมสารเจือให้กับเส้นใยแก้วนำแสงนั้นท่อนำคลื่นที่ได้จะมีความสมมาตร และสามารถนำมาเชื่อมต่อเข้าได้กับใยแก้วนำแสงโดยให้การลดทอนสัญญาณที่จุดต่อที่ต่ำ

รูปที่ 2.16 แสดงระดับพลังงานของเออร์เบียมในแก้ว การดูดกลืนแสงโดยอิเล็กตรอนในสถานะพื้นฐานจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในที่สูงกว่าระดับเลเซอร์ทันที ในสถานะเลเซอร์นี้จะมีช่วงชีวิตที่ยาวและกระทำตัวเหมือนชั้นสะสมอิเล็กตรอน โฟตอนที่มีความยาวคลื่น 1535 นาโนเมตร จะถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนที่เหมือนกันและออกมาเป็นเลเซอร์หรือมีการขยายสัญญาณเกิดขึ้น

พิจารณาจากไดอะแกรมของระดับพลังงานของแถบสเปกตรัม เลเซอร์บีเอ็มที่จะนำมาใช้งาน ได้ดีที่สุดจะมีอยู่สองช่วงคือที่ 980 นาโนเมตร และที่ 1460 - 1490 นาโนเมตร ซึ่งที่ 980 นาโนเมตร จะมีเกน 3.9 dBmW^{-1} ใช้เลเซอร์ไดโอดที่เป็น GaAlAs เป็นตัวกระตุ้น ส่วนที่ 1460 - 1490 นาโนเมตรจะมีเกนอยู่ที่ 2.2 dBmW^{-1} ใช้เลเซอร์ไดโอดที่เป็น GaAsP เป็นตัวกระตุ้น



รูปที่ 2.16 แสดงระดับพลังงานของเออร์เบียมในใยแก้วนำแสง



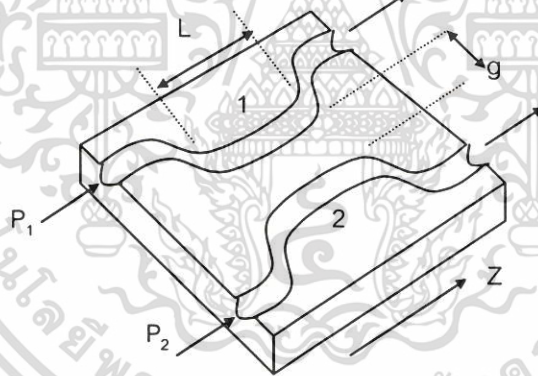
รูปที่ 2.17 แสดงค่าอัตราขยายที่ขึ้นความยาวคลื่นของใยแก้วนำแสงที่โดปเออร์เบียม

อัตราขยายสูงสุดที่ทำได้ของตัวขยายสัญญาณแบบนี้ทำได้ถึง 46.5 dB โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 1480 นาโนเมตร พลังงาน 133 mW และอัตราขยาย 25 - 40 dB โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร พลังงาน 40-100 mW การขยายสัญญาณโดยใช้ใยแก้วจะมีการสูญเสียจากรอยต่อที่ต่ำ ทำให้การขยายสัญญาณที่ได้มีค่าให้เคียงกับค่าจริงเมื่อนำไปใช้งานแต่ค่าแบนด์วิดท์ทางแสงมีค่าจำกัดมากกว่าของตัวขยายสัญญาณแบบสารกึ่งตัวนำทำให้มีค่าอิมพัลส์ของเอาต์พุตต่ำ ที่ -5 ถึง +3 dB รูปที่ 2.17 แสดงแปลกรรมของใยแก้วนำแสงที่โคปด้วยเออร์เบียม จะเห็นการตอบสนองอยู่ในย่านความยาวคลื่นในย่านการสื่อสาร

2.3 คัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Couplers)

2.3.1 บีบของคลื่นต่อเนื่องที่กำลังต่ำ (Low-Power Continuous Wave Beams)

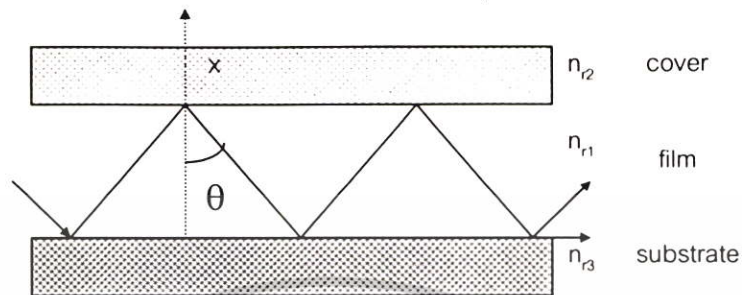
พิจารณากรณีที่เป็นพื้นฐานที่สุดไม่คิดผลความไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้คลื่นต่อเนื่องใส่เข้าไปในแกนที่หนึ่งของคัปเปิลอร์ จะเกิดการคัปปลิงระหว่างเส้นใยนำแสงนั้นคือการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างโหมดแสงทั้งสองภายในเส้นใยนำแสงบริเวณการคัปปลิง พิจารณาคู่ควมแสงอย่างง่ายแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงคัปเปิลอร์ทางแสง

จากรูปที่ 2.18 จะพิจารณาในกรณีของเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว ประกอบด้วยตัวนำสองตัวซึ่งมีช่วงบริเวณที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างกันยาว L อยู่ห่างกันเป็นระยะ g มีกำลังแสงเข้าเป็น P_1 และ P_2 ดังรูป เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมดทั้งสองอยู่ใกล้กันมากจึงเกิดการทำอันตรกิริยาระหว่างโหมดทั้งสองหรือเกิดการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้กำลังแสงของโหมดทั้งสองเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน และคู่ควมแสงที่สร้างขึ้นนี้ใช้เส้นใยนำแสงที่มีความเหมือนกันทุกประการทำให้โหมดแสงภายในท่อนำแสงมีความสมมาตรกันสามารถพิจารณาโหมดแสงโหมดใดโหมดหนึ่งได้ ซึ่งเรียกท่อนำแสงชนิดนี้ว่าท่อนำแสงแบบไอ

เดนมติคัลคอมโพสิต (Identical composite waveguide) กำหนดให้ A_1 และ A_2 เป็นแอมพลิจูดของแสงในตัวนำที่ 1 และ 2 และสมมติให้ค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ของแสงทั้งสองตัวนำดังนี้ $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ เมื่อกำหนดให้ β คือค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ประสิทธิผล (Effective propagation constant) ในทิศ z ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่เฟส พิจารณาจากตัวนำในรูปที่ 2.19 ดังนี้



รูปที่ 2.19 แสดงตัวนำแบบฟิล์ม

จากรูปที่ 2.19 ตัวนำฟิล์ม (Film) มีความหนา h และมีแสงทำมุมตกกระทบกับแกน x เมื่อ n_{r1} , n_{r2} และ n_{r3} คือดัชนีหักเหของฟิล์ม ชั้นเปลือก (Cover) และชั้นฐาน (Substrate) ตามลำดับ

$$\beta = kn_{r1} \sin \theta \equiv \frac{\omega}{v_p} \quad (2.29)$$

เมื่อ k คือคลื่นเวกเตอร์ และ v_p คือความเร็วเฟส

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \equiv \frac{\omega}{c} \quad (2.30)$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง λ คือความยาวคลื่นแสง ω คือความถี่เชิงมุม และมีเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ดังนี้

$$kn_{r3} < \beta < kn_{r1} \quad (2.31)$$

จะได้สมการการเคลื่อนที่อธิบายแอมพลิจูดของตัวนำอย่างง่ายดังนี้

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -i\beta_1 A_1(z) \quad (2.32)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -i\beta_2 A_2(z) \quad (2.33)$$

สมการที่ (2.32) และ (2.33) เป็นกรณีที่ยังไม่เกิดการคับปลิงแสง มีคำตอบของสมการคือ

$$A_1(z) = A_1(0)e^{-i\beta_1 z} \quad (2.34)$$

$$A_2(z) = A_2(0)e^{-i\beta_2 z} \quad (2.35)$$

และถ้าในช่วงความยาว L ที่มีการรบกวนนั้น จะมีการซ้อนเหลื่อมกันของคลื่น โดยกำหนดให้ K แทนการรบกวนของคลื่นสองโหมดหรือเกิดการคัปปลิงกำลังแสงระหว่างคู่ควบแสง จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -i\beta_1 A_1(z) - iKA_2(z) \quad (2.36)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -i\beta_2 A_2(z) - iKA_1(z) \quad (2.37)$$

เรียกสมการ (2.36) และ (2.37) ว่าสมการโหมดคัปปลิง (Coupled mode equations) โดยที่ K เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิง (Coupling coefficients) และมีค่าคงที่การเคลื่อนที่ในกรณีทั่วไปคือ

$$\beta = \beta_r - \frac{i\alpha_{loss}}{2} \quad (2.38)$$

เมื่อ α_{loss} คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียในตัวนำและ β_r คือส่วนจริงของค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ ในการหาคำตอบของสมการ (2.36) และ (2.37) นั้นจะสมมติให้ตอนเริ่มต้นมีแสงเข้าไปในตัวนำที่ 1 เท่านั้นตรงจุดที่ $z = 0$ จะได้เงื่อนไขดังนี้

$$A_1(0) = 1 \quad (2.39)$$

$$A_2(0) = 0 \quad (2.40)$$

จากสมการ (2.36) และ (2.37) จะได้คำตอบในรูปอย่างง่ายคือ

$$A_1(z) = \cos(Kz)e^{-i\beta_1 z} \quad (2.41)$$

$$A_2(z) = -i \sin(Kz)e^{-i\beta_2 z} \quad (2.42)$$

จะได้กำลังแสงที่ตำแหน่งใดๆ ตามแนวแกน z คือ

$$P_1(z) = A_1(z)A_1(z)^* = \cos^2(Kz)e^{-\alpha_{loss}z} \quad (2.43)$$

$$P_2(z) = A_2(z)A_2(z)^* = \sin^2(Kz)e^{-\alpha_{loss}z} \quad (2.44)$$

สมการ (2.43) และ (2.44) อาจเขียนได้ในรูปทั่วไปดังนี้

$$P_1(z) = 1 - \frac{1}{1 + (\Delta\beta)^2 / 4K^2} \sin^2 \left[\sqrt{1 + \frac{(\Delta\beta)^2}{4K^2}} Kz \right] \quad (2.45)$$

$$P_2(z) = \frac{1}{1 + (\Delta\beta)^2 / 4K^2} \sin^2 \left[\sqrt{1 + \frac{(\Delta\beta)^2}{4K^2}} Kz \right] \quad (2.46)$$

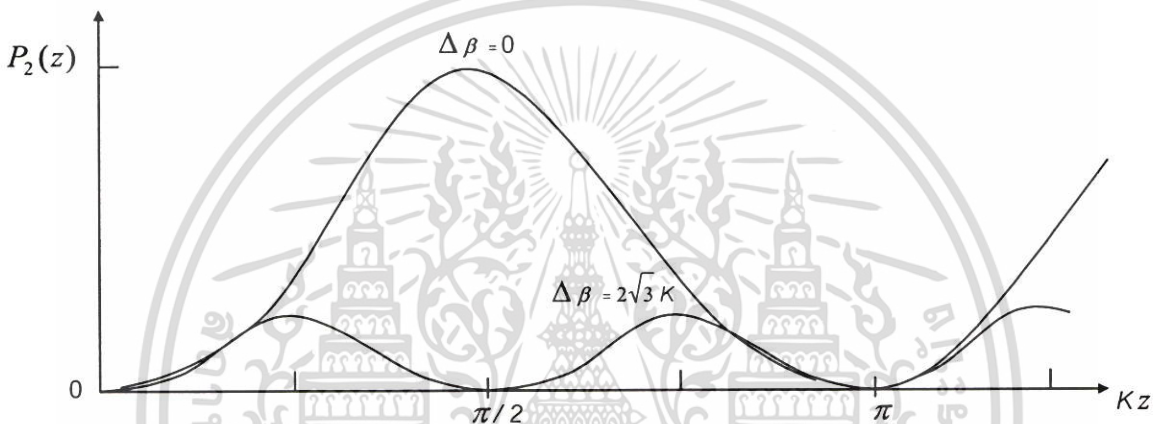
สำหรับกรณีคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน ระยะทางที่สั้นที่สุดเมื่อแสงเดินทางเข้าสู่ตัวนำที่ 1 หรือ 2 แล้วเกิดการคัปปลิงแสงไปสู่ตัวนำอีกตัวหนึ่งได้อย่างสมบูรณ์ เรียกว่า ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต (Half-Beat-Length) หรือ ความยาวคัปปลิง (Coupling Length, L_c) มีค่าเป็น

$$L_c = \frac{\pi}{2K} \quad (2.47)$$

ถ้าตัวนำมีค่าคงที่ในการเคลื่อนที่ไม่ตรงกันหรือ $\beta_1 \neq \beta_2$ แสงจากอีกตัวนำหนึ่งจะไม่ทะลุผ่านไปสู่อีกตัวนำหนึ่งได้หรือจะเกิดการคับปลิงได้เมื่อ

$$\Delta\beta = |\beta_1 - \beta_2| = 0 \quad (2.48)$$

แสดงให้เห็นได้โดยง่าย โดยจากสมการ (2.45) และ (2.46) เมื่อแสงเข้าสู่ตัวนำที่ 1 จะเห็นได้ว่า ถ้า $\Delta\beta \neq 0$ และ $(\Delta\beta)^2 \gg 1$ แล้ว $P_1(z) \approx 1$ และ $P_2(z) \approx 0$ หรือไม่เกิดการคับปลิงแสงจากตัวนำที่ 1 ไปสู่ตัวนำที่ 2 ขึ้น และจากสมการ (2.46) เมื่อนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $P_2(z)$ กับ Kz ที่ $\Delta\beta = 0$ และ $\Delta\beta = 2\sqrt{3}K$ จะได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $P_2(z)$ กับ Kz

จากรูป 2.20 จะเห็นว่าการส่งผ่านพลังงานอย่างสมบูรณ์จากตัวนำที่ 1 ไปสู่ตัวนำที่ 2 ตรงตามเงื่อนไขคือที่ $\Delta\beta = 0$ หรือ $\beta_1 = \beta_2$ หรือเรียกว่าเงื่อนไขเฟสตรงกัน (Phase-matching) ซึ่งจะได้ระยะทางสั้นที่สุด z เป็นตามสมการ (2.47) โดยสามารถเลือกชนิดของแกนคู่ควบแสงที่มีเฟสต่าง ๆ กันนี้นำไปประยุกต์ทำสวิตทางแสงได้

ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงกำลังแสงระหว่างโหมดของคู่ควบแสงนั้น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการคำนวณหาลำดับแสงสัมพันธ์ภายในคู่ควบแสง และจากสมการที่ (2.45) และ (2.46) สามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$P_1(z) = \cos^2 \int_{-\infty}^{\infty} C(z) dz \quad (2.49)$$

$$P_2(z) = \sin^2 \int_{-\infty}^{\infty} C(z) dz \quad (2.50)$$

ซึ่งสามารถกำหนดช่วงความยาวเพื่อหาค่าการอินทิเกรตได้ เช่น $\int_0^z C(z) dz$ เมื่อ $C(z)$ คือสัมประสิทธิ์การคัปปลิง ซึ่งหาได้ดังนี้

$$C(z) = \frac{\sqrt{\delta}(U(z))^2 K_0(W(z)d(z)/a(z))}{a(z)(V(z))^3 K_1^2(W(z))} \quad (2.51)$$

โดยที่ $\delta = 1 - (n_1/n_2)^2$

$$V(z) = a(z)k(n_1^2 - n_3^2)^{1/2}$$

$$U(z) = a(z)k(n_2^2 - (\beta/k)^2)^{1/2}$$

$$W(z) = a(z)k((\beta/k)^2 - n_1^2)^{1/2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

เมื่อ K_0 และ K_1 คือฟังก์ชันเบสเซลดัดแปลง (Modified bessel functions) อันดับที่หนึ่งและสองตามลำดับ $a(z)$ คือรัศมีภาคตัดขวางของตัวนำแสงที่จุด z ใด ๆ n_1 n_2 และ n_3 คือดัชนีหักเหของแกน แคลดคิง และสิ่งแวดล้อมภายนอกเส้นใยนำแสงตามลำดับ (β/k) คือโหมดดัชนีประสิทธิผล (Mode effective index) โดยค่าที่คำนวณได้ตามสมการที่ (2.51) นี้เป็นเพียงค่าสัมประสิทธิ์ที่จุดใด ๆ เท่านั้น

2.3.2 การสวิตแบบกึ่งคลื่นต่อเนื่อง (Quasi-CW Switching) [13]

พิจารณาผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง ใช้การสวิตโดยอาศัยความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลางโดยใช้คลื่นต่อเนื่องโดยการสวิตขึ้นอยู่กับพิกกำลังงานที่ใช้ (Power Switching) จากสมการโหมดคัปปลิงแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Coupled Mode Equations) มีค่าเป็นดังนี้

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = i\gamma(|A_1(z)|^2 + \sigma|A_2(z)|^2)A_1 + iKA_2(z) \quad (2.52)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = i\gamma(|A_2(z)|^2 + \sigma|A_1(z)|^2)A_2 + iKA_1(z) \quad (2.53)$$

โดยนิยาม กำลังงานวิกฤต (Critical Power) $P_c = 4K/[\gamma(1-\sigma)]$ และคำตอบที่ได้จากสมการข้างต้นมีค่าเป็น [13]

$$P_1(z) = |A_1(z)|^2 = 0.5P_0[1 + cn(2Kz | m)] \quad (2.54)$$

เมื่อ $\text{cn}(x|m)$ คือจาโคบีอีลิปติกฟังก์ชัน (Jacobi Elliptic Function) และ $m=(P_0/P_c)^2$ ในกรณีกำลังงานต่ำ (m น้อยกว่า 1 มาก) ดังนั้นสมการ (2.54) จะลดรูปเป็น $P_1(z) = P_0 \cos^2(Kz)$ นั่นคือมีลักษณะการส่งผ่านกำลังงานกลับไปกลับมาระหว่างแกนทั้งสองมีลักษณะเป็นคาบ(Periodic) เป็นกรณี $P_0 < P_c$ อย่างไรก็ตามเมื่อ P_0 เข้าใกล้ P_c ค่าคาบของการส่งถ่ายกำลังงานกลับไปมาระหว่างแกนทั้งสองจะมากขึ้น และค่าของคาบจะมีค่าไม่จำกัดเมื่อ $P_0 = P_c$ หรือ สมการจะอยู่ในรูป $P_1(z)=0.5P_0[1+\text{sech}(2Kz)]$ ที่ $m=1$ กำลังงานเกินกว่าครึ่งหนึ่งยังอยู่ที่แกนที่สอง และสำหรับกรณี $P_0 > P_c$ ค่าตอบที่ได้มีลักษณะเป็นคาบแบบตอนแรกแต่กำลังงานที่ถูกส่งไปแกนที่สองลดน้อยลงต่ำกว่า 50% และลดน้อยลงไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้เมื่อ P_0 มากกว่า ค่า P_c มากๆ นั่นคือสัญญาณที่ได้จะอยู่แต่ในแกนที่หนึ่งตลอดไปที่กำลังงานสูงๆ หลักการนี้สำคัญอย่างมากสำหรับงานสวิตชิงเชิงกำลัง เราจะใช้หลักการนี้อธิบายการสวิตของโซลิตอนในคัปเปิลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมในโอกาสต่อไป

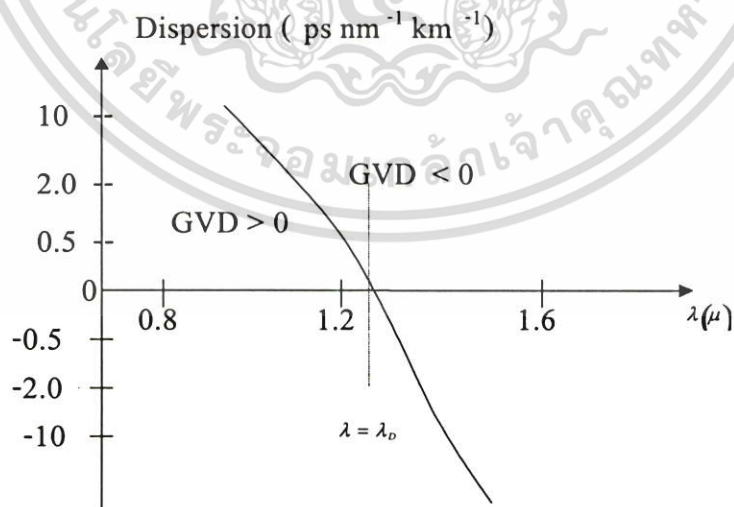
2.4 การกระจายความเร็วกลุ่ม (Group Velocity Dispersion, GVD)

การกระจายที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของพัลส์แสงมากและสำคัญที่สุดคือ GVD โดยมีบทบาทสำคัญที่พบเห็นอยู่ในเทอมของดัชนีหักเห (n_0) คือ

$$n_0(\omega) = \frac{ck(\omega)}{\omega} \quad (2.55)$$

เมื่อ c คือความเร็วของแสง k คือเลขคลื่นที่สามารถกระจายออกเป็นอนุกรมได้ดังนี้

$$k(\omega) = k_0 + \left(\frac{\partial k}{\partial \omega}\right)(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\right)(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.56)$$



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความเร็วกลุ่มในใยแก้วนำแสง

เมื่อ $k=k_0$ จะได้

$$\left(\frac{\partial k}{\partial \omega}\right) = \frac{1}{V_g} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\omega n_0(\omega)}{c} \right) = \frac{1}{c} \left(n_0(\omega) + \omega \frac{\partial n_0}{\partial \omega}(\omega) \right) \quad (2.57)$$

และ

$$\left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\right) = k'' = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{1}{V_g} \right) = \frac{1}{V_g^2} \frac{\partial V_g}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \left(2 \frac{\partial n_0}{\partial \omega}(\omega) + \omega \frac{\partial^2 n_0}{\partial \omega^2}(\omega) \right) \quad (2.58)$$

เมื่อ V_g เป็นความเร็วกลุ่ม และ k'' สอดคล้องกับการกระจายแบบความเร็วกลุ่ม ซึ่งไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแก้วเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับคุณสมบัติของท่อใยแก้วด้วย สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของความยาวคลื่น ($\lambda=2\pi c/\omega$) ได้คือ

$$\frac{\partial n_0}{\partial \omega} = \frac{\partial n_0}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{\partial n_0}{\partial \lambda} \quad (2.59)$$

และจากสมการ (2.57) ได้

$$\frac{1}{V_g} = \frac{1}{c} \left[n_0(\lambda) - \lambda \frac{\partial n_0}{\partial \lambda}(\lambda) \right] \quad (2.60)$$

และจากสมการ (2.58) ได้

$$k'' = \left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\right) = \frac{-\lambda^2}{2\pi c} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{V_g} \right) = \frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad (2.61)$$

เมื่อ D คือพารามิเตอร์การแพร่กระจายที่แทนด้วยความสัมพันธ์

$$D = \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_0}{\partial \lambda^2}(\lambda) \quad (2.62)$$

จากกราฟในรูปที่ 2.21 แสดงการกระจาย (D) จะมีค่าต่ำเมื่อ $\lambda = \lambda_D \approx 1.3 \mu\text{m}$ และเมื่อ $\lambda < \lambda_D$ จะได้การกระจายปกติ (Normal GVD) ซึ่งมีค่า k'' เป็นบวก ในทางตรงกันข้ามเมื่อ $\lambda > \lambda_D$ จะได้การกระจายไม่ปกติ (Anomalous GVD) ซึ่งมีค่า k'' เป็นลบ ผลจากการกระจายนี้ทำให้พัลส์ขยายกว้างออก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องประกอบด้วยปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่จะทำการชดเชยการกระจายออกของพัลส์ เพื่อให้ได้มาซึ่งโซลิตอนที่สมบูรณ์

2.5 ลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของตัวกลาง (Nonlinearity) [10]

ในการตอบสนองของตัวกลางสารไดอิเล็กตริกที่มีต่อสนามไฟฟ้าความเข้มสูงนั้น จะเริ่มแสดงคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแสง มีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสงดังนี้

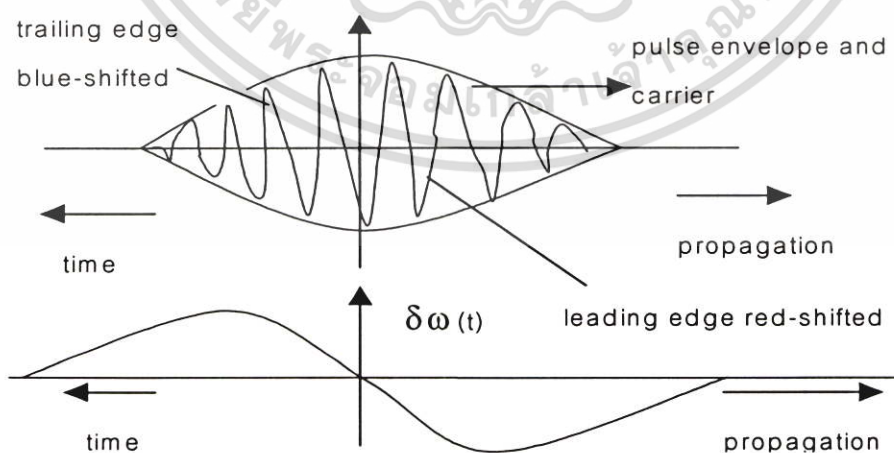
$$n = n_0 + n_2 I$$

โดยที่ n_0 คือดัชนีหักเหเชิงเส้น n_2 คือสัมประสิทธิ์ของเคอร์ (Kerr coefficient) และ I คือ ความเข้มแสง

จากสมการนี้ทำให้ทราบว่าค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับความเข้มแสง ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเลื่อนเฟส (Phase shift) เป็นดังนี้

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L n_2 I$$

ลักษณะการเลื่อนเฟสนี้เกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับการกระจายแบบไม่ปกติ เราเรียกลักษณะการเลื่อนเฟส กรณีนี้ว่าเซลเฟสมอดูเลชัน (Self Phase Modulation, SPM) จากรูปที่ 2.22 เป็นรูปแสดงการเชิร์พ (Chirp) ของความถี่เนื่องจากเซลเฟสมอดูเลชัน ผลคือ ความถี่จะสูงขึ้นในบริเวณขอบด้านหลังของพัลส์ แต่เนื่องจากในตัวกลางไม่ปกตินี้คลื่นความถี่สูงจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าคลื่นความถี่ต่ำ ดังนั้นบริเวณขอบด้านหลังของสัญญาณจะเร็วขึ้น ส่วนบริเวณขอบด้านหน้าของพัลส์จะมีความต่ำลง ซึ่งลักษณะการเชิร์พนี้จะแตกต่างกันกับเชิร์พที่เกิดจากการกระจายความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติ ดังนั้นเซลเฟสมอดูเลชันจะช่วยทำให้ความยาวคลื่นยาวที่ถูกหน่วงโดยผลการกระจายนั้นสามารถกลับสู่สภาพที่ไม่มีกระจายได้ เพราะที่ทั้งสองเป็นปฏิกิริยาที่หักล้างกัน ส่วนความยาวคลื่นสั้นก็เกิดขึ้นในลักษณะคล้ายกัน ผลก็คือ ได้พัลส์โซลิตอนที่ไม่เปลี่ยนรูปร่าง



รูปที่ 2.22 แสดงเชิร์พ (chirp) ความถี่เนื่องจาก เซลเฟสมอดูเลชัน

2.6 สมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Schrödinger Equation , NLS)[10,13,14,15]

เป็นสมการที่ใช้อธิบายการแพร่ของพัลส์โซลิตอนทางแสงโดยคิดมาจากผลของการกระจายความเร็วกลุ่มไม่ปกติและความไม่เชิงเส้นดังสมการคือ

$$j \frac{\partial U}{\partial \xi} - \operatorname{sgn}(k'') \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + N^2 |U|^2 U = 0 \quad (2.63)$$

เมื่อ

$$\xi = \frac{k'' z}{T_0^2} = \frac{z}{z_0}$$

$$\tau = \frac{(t - z/v_g)}{T_0}$$

$$N^2 = \gamma P_0 T_0^2 / |k''|$$

$\gamma = 2\pi n_2 / (\lambda A_{\text{eff}})$ คือ พารามิเตอร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Parameter)
 P_0 คือ พิกกำลังงาน

เมื่อ U คือองค์ประกอบของนอร์มัลไรซ์เอนเวลลอปพัลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ξ คือโคออร์ดิเนต τ เป็นเวลาที่เคลื่อนที่ในกรอบอ้างอิงของความเร็วกลุ่ม และ $j = \sqrt{-1}$ และโดยที่ $\operatorname{sgn}(k'')$ ให้ค่า 1 เมื่อ k'' เป็นบวก (Normal GVD) และให้ค่าเป็น -1 เมื่อ k'' เป็นลบ (Anomalous GVD) และพารามิเตอร์ N คืออันดับ (Order) ของโซลิตอน T_0 คือ ความกว้างของพัลส์ A_{eff} คือ เอฟเฟกตีฟคอร์เอเรีย (Effective Core Area)

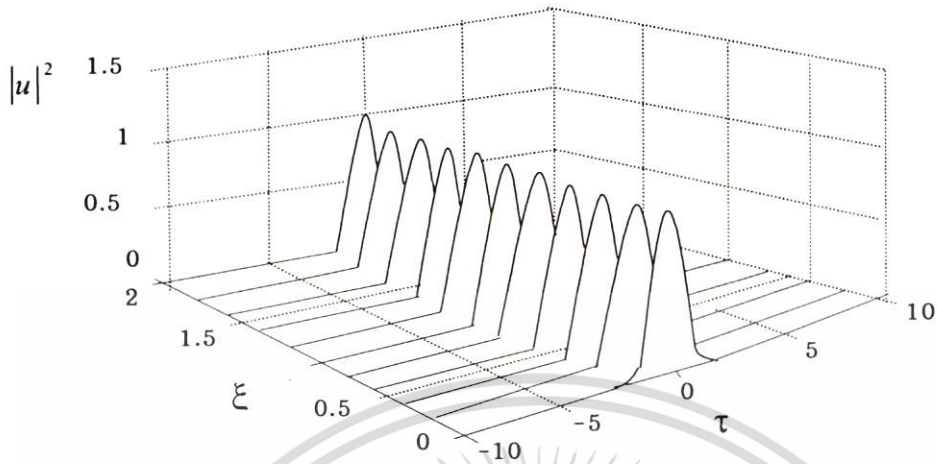
สมการ NLSE สามารถแก้ได้อย่างถูกต้องด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ คือ วิธีการกระเจิงกลับ (Inverse Scattering Technique, IST) ทั้งในกรณีที่เป็นการกระจายแบบปกติหรือไม่ปกติ ถ้า $k'' < 0$ เรียกว่า “โซลิตอนด้านสว่าง” (Bright Soliton) ส่วนกรณี $k'' > 0$ หรือการกระจายแบบปกติ เรียกว่า “โซลิตอนด้านมืด” (Dark Soliton) ในทางปฏิบัติเรามักสนใจแต่ Bright soliton เท่านั้นและมักสนใจในกรณีที่ $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ ซึ่งตรงกับการสูญเสียที่ต่ำที่สุดและตรงกับที่ใช้ในเส้นใยนำแสงที่โคปเปอร์เบียมสำหรับการสื่อสาร

2.6.1 โซลิตอนพื้นฐาน (Fundamental Soliton ; $N = 1$)

ในการหาคำตอบโซลิตอนพื้นฐานนั้นได้จากการแก้สมการที่ (2.63) โดยวิธีวิเคราะห์ (Analytical method) ซึ่งมีคำตอบเป็น

$$u(\xi, \tau) = \operatorname{sech}(\tau) \exp(j\xi/2) \quad (2.64)$$

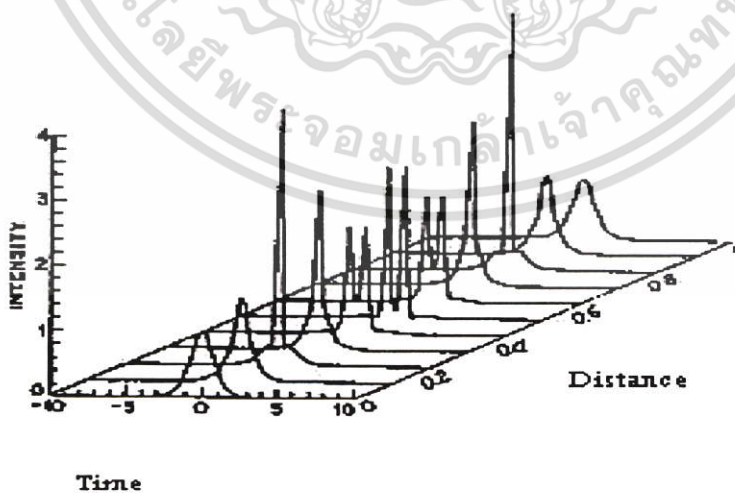
ดังแสดงในรูปที่ 2.23 จะเห็นว่าในกรณี $N = 1$ นี้ พัลส์จะไม่เปลี่ยนรูปร่างตลอดการเคลื่อนตัวของโซลิตอน



รูปที่ 2.23 แสดงการเคลื่อนตัวของโซลิตอนพื้นฐาน

2.6.2 โซลิตอนอันดับสูง (Higher-Order Solitons)

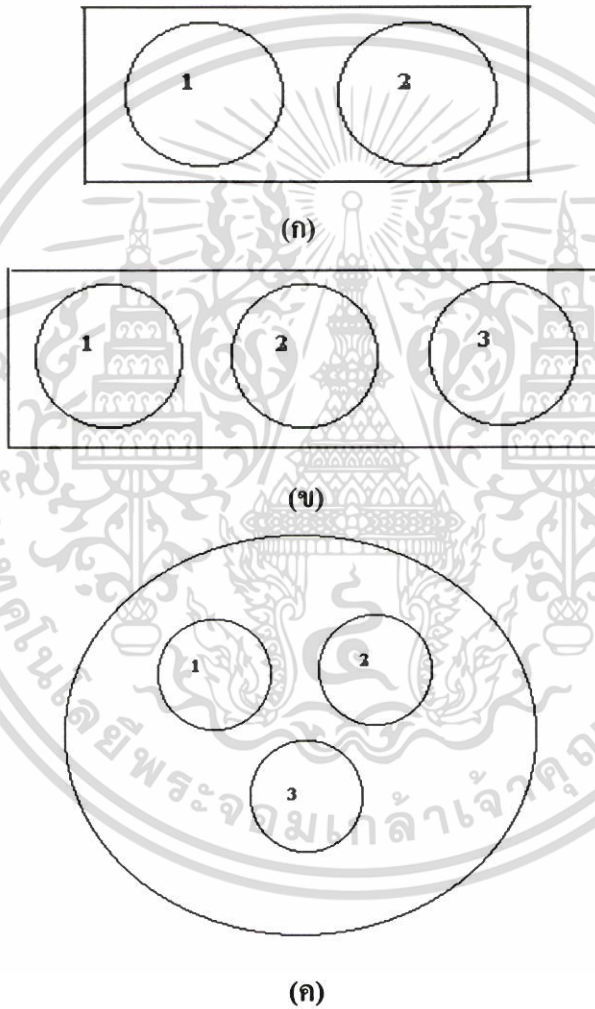
กรณีนี้ N เป็นจำนวนเต็มที่มีค่ามากกว่า 1 ขณะที่พัลส์เดินทางไปในเส้นใยนำแสงพัลส์จะหดตัวและแตกออก และก็จะกลับมารวมกันอีกครั้งเหมือนพัลส์เริ่มต้นเป็นคาบ ณ ตำแหน่งซึ่งเหมือนเดิมนี้ คือ $\xi = m\pi/2$ เมื่อ m คือจำนวนเต็มและลักษณะรูปคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปดังกล่าวเป็นผลมาจากความต่างเฟสระหว่างโซลิตอน รูปที่ 2.24 แสดงการเคลื่อนตัวของโซลิตอนอันดับสาม ($N=3$)



รูปที่ 2.24 แสดงการเคลื่อนตัวของโซลิตอนอันดับสาม

2.7 รูปแบบของคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงไม่เชิงเส้นแบบสอง และ สามแกน (Two and Three Core Nonlinear Directional Couplers)

คัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงไม่เชิงเส้นคือการนำท่อนำคลื่น (Waveguide) ตั้งแต่สองอันมาวางใกล้ ๆ กันแล้วผ่านขบวนการเพื่อหลอมรวมเข้าด้วยกัน เมื่อทำการป้อนสัญญาณแสงเข้าไปในคัปเปิลอร์ทำให้เกิดการคัปปลิงของสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะมีข้ามไปแกนอื่นๆ ของคัปเปิลอร์ได้ มีการนำคัปเปิลอร์ไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เช่น อุปกรณ์สวิตช์ ฟิวเตอร์ เป็นต้น รูปที่ 2.25 แสดงเป็นแผนภาพแสดงรูปแบบของคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงไม่เชิงเส้นในกรณีของสองและสามแกน



รูปที่ 2.25 แผนภาพลักษณะการจัดวางแกนต่างๆในคัปเปิลอร์ (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า

2.8 สมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้นที่คัปปลิงกัน (Coupled Nonlinear Schrödinger Equation, CNLS) [3,5,7,8]

เราจะพิจารณาคัปเปลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมเพื่อใช้งานในช่วงเกนค่าสูงสุด (Peak Gain) ของเออร์เบียม ($\lambda \cong 1.55 \mu\text{m}$) การใช้โซลิตอนทำให้เกิดการสวิตของสัญญาณเกิดขึ้นโดยแทบไม่มีปัญหาการคงค้างของสัญญาณอยู่ในช่องสัญญาณอื่นขณะทำการสวิต สมการที่อธิบายการเคลื่อนตัวของพัลส์โซลิตอนในคัปเปลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียม แยกพิจารณาโหมดเดี่ยวของแต่ละแกนที่มีการกระจายความเร็วกลุ่มแบบไม่ปกติและความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นบวก และรวมผลของเกน (Gain) คือ สมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้นที่คัปปลิงกัน (Coupled system of Nonlinear Schrödinger Equation, CNLS) มีค่าสมการเป็นดังนี้

สำหรับแบบจำลอง Two-cores coupler :

$$\begin{aligned} j \frac{\partial u_1}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa u_2 - |u_1|^2 u_1 + j \hat{G}_i u_1 \\ j \frac{\partial u_2}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa u_1 - |u_2|^2 u_2 + j \hat{G}_i u_2 \end{aligned} \quad (2.65)$$

สำหรับแบบจำลอง Three-cores coupler array :

$$\begin{aligned} j \frac{\partial u_1}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa u_2 - |u_1|^2 u_1 + j \hat{G}_i u_1 \\ j \frac{\partial u_2}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_3) - |u_2|^2 u_2 + j \hat{G}_i u_2 \\ j \frac{\partial u_3}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2} - \kappa u_2 - |u_3|^2 u_3 + j \hat{G}_i u_3 \end{aligned} \quad (2.66)$$

สำหรับแบบจำลอง Triangular three-cores coupler :

$$\begin{aligned} j \frac{\partial u_1}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa(u_2 + u_3) - |u_1|^2 u_1 + j \hat{G}_i u_1 \\ j \frac{\partial u_2}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_3) - |u_2|^2 u_2 + j \hat{G}_i u_2 \\ j \frac{\partial u_3}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_2) - |u_3|^2 u_3 + j \hat{G}_i u_3 \end{aligned} \quad (2.67)$$

เมื่อค่า u_i ($i = 1,2,3$) คือองค์ประกอบของนอร์มัลไรซ์เอนเวลลอปของพัลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ในแกนเส้นใยแก้วนำแสง ξ คือโคออร์ดิเนตของตำแหน่ง τ คือเวลาที่เคลื่อนที่ในกรอบอ้างอิงของความเร็วกลุ่ม K คือสัมประสิทธิ์ในการคัปปลิงเชิงเส้น (Linear Coupling Coefficient) และ \hat{G}_i คือ ค่าเกน โอเปอเรเตอร์ (Gain Operator) ที่ขึ้นกับเวลาหรือความถี่

2.8.1 กรณีเกนแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth)[3,5,13]

สำหรับความกว้างพัลส์ที่ไม่แคบมากนัก ค่าแบนด์วิดท์ของพัลส์ (Pulse Bandwidth) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเกนแบนด์วิดท์ (Gain Bandwidth) ของตัวกลาง (Medium) เป็นการพิจารณาเกนที่ไม่ขึ้นกับเวลาหรือความถี่ ดังนั้นเกนแบนด์วิดท์มีค่าไม่จำกัด โดย \hat{G}_i มีค่าเป็น

$$\hat{G}_i = \Gamma \quad (2.68)$$

เมื่อ Γ คือสัมประสิทธิ์เกนเชิงเส้น (Linear Gain Coefficient) มีค่าคงที่ ในทางปฏิบัติไม่มีวัสดุ (Material) ใดที่จะมีเกนแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัด นี่เป็นการประมาณให้เกนมีค่าคงที่ทั่วทั้งแบนด์วิดท์ของพัลส์ ผลของเกนแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัดส่งผลต่อการลดกำลังงานการสวิตและเพิ่มความคมชัดของค่าส่งผ่านสัญญาณ โดยค่าอัตราขยายจะแสดงได้ด้วยระดับของการปั๊ม (Pumping Level)

2.8.2 กรณีเกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth)[3,5,8,13]

สำหรับความกว้างพัลส์ที่แคบมากๆ ค่าแบนด์วิดท์ของพัลส์ (Pulse Bandwidth) จะมีค่ามากเพียงพอเมื่อเทียบกับเกนแบนด์วิดท์ (Gain Bandwidth) ของตัวกลาง (Medium) ผลก็คือองค์ประกอบทางความถี่ของพัลส์ได้รับอัตราขยายที่แตกต่างกัน ตัวกระทำเกน (Gain Operator) ในมิติของเวลา แสดงความสัมพันธ์ได้โดย

$$\hat{G}_i = \Gamma + \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \right) \quad (2.69)$$

หรือสมมูลกับ เกนที่ขึ้นกับความถี่ดังนี้

$$\hat{G}_i(\omega) = \Gamma - \mu \omega^2 \quad (2.70)$$

เมื่อพารามิเตอร์ μ คือ การกระจายของเกน (Gain Dispersion) เป็นปริมาณไม่มีหน่วย (Dimensionless Quantity) ขึ้นอยู่กับ ความกว้างพัลส์(Pulse Width) และ เกนแบนด์วิดท์ (Gain Bandwidth) ส่วน Γ คือสัมประสิทธิ์เกนเชิงเส้น (Linear Gain Coefficient) โดยการประมาณเลือกใช้แบบจำลองพาราโบลาเกนแบนด์ (Parabolic Gain Band) กับเกนสเปกตรัมของตัวขยายสัญญาณทางแสง โดยครอบคลุมแบนด์วิดท์สเปกตรัมของพัลส์ ถ้าใช้ $\Delta\omega$ คือ FWHM ของพาราโบลาเกนแบนด์ จะได้ว่า $\mu = 2\Gamma / (T_0 \Delta\omega)^2 = \Gamma T_2^2 / T_0^2$ เมื่อ T_0 คือความกว้างของอินพุตพัลส์ (Input

Pulse Width) โดย $T_0 \approx T_{FWHM}/1.76$ สำหรับพัลส์ชนิด sech^2 และ T_2 คือ โพลาริเซชันรีแลกเซชันไทม์ (Polarization Relaxation Time) ของอัตราขยายของตัวกลาง ตัวอย่างเช่นถ้าเราสมมุติเกนของเออร์เบียม ที่ซึ่งมี 26-nm gain bandwidth แล้วจะได้ว่า $\mu = 0.03$ จะสอดคล้องกับความกว้างของพัลส์เท่ากับ 275-fs ผลการกระจายของเกนทำให้เกิดการลดลงของเกนสำหรับองค์ประกอบสเปกตรัมที่ไกลออกไปจากความถี่คลื่นพาห์ (Carrier Frequency, ω_0) ผลก็คือพัลส์โซลิตอนจะได้รับพลังงานรวมจากสารตัวกลางน้อยลง เป็นผลทำให้เกิดการลดลงของกำลังงานเอาต์พุต

2.8.3 กรณีผลการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation) [8,13]

สำหรับกรณีทั่วไปค่า s จะมีค่าน้อยมาก ผลของการอิ่มตัวของเกนสามารถละทิ้งได้สำหรับพัลส์เดี่ยว (Single Pulse) แต่สำหรับขบวนพัลส์ (Pulse Train) ไม่สามารถละทิ้งได้ สมการที่ (2.65) ถึง (2.67) ข้างต้นอาจทำการพิจารณากรณีโดยทั่วไปได้โดยกำหนดให้ $\hat{G}_i = (L_D)/2 g_i$ เมื่อ \hat{g}_i คือ เกนโอเปอเรเตอร์ (Gain Operator) อีกตัวหนึ่ง ใช้อธิบายเกนของคัปเปอเรอร์ที่โคไปด้วยเออร์เบียม และค่าระยะทางในการกระจาย (Dispersion Length) $L_D = T_0^2/k''$ หากเราพิจารณาภายใต้ข้อสมมติฐาน $\Delta\omega T_2 < 1$ เมื่อ $\Delta\omega$ คือ ความกว้างของพัลส์สเปกตรัม (Pulse Spectral Width) T_2 คือ โพลาริเซชันรีแลกเซชันไทม์ (Polarization Relaxation Time) และโดยการประมาณเกนที่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณมีค่าเป็นดังนี้ $\hat{g}_i(\omega) = g_p [1 - (\omega - \omega_0)^2 T_2^2]$ เมื่อ g_p คือ พิกเกน (Peak Gain) และสมมติว่าความถี่ของคลื่นพาห์ (Carrier Frequency) ω_0 ทับกันสนิทกับพิกเกน เราสามารถแทน $\omega - \omega_0$ ในรูปมิติของเวลา (Time Domain) ด้วยโอเปอเรเตอร์ $j(\partial/\partial t)$ ดังนั้นค่า \hat{g}_i เขียนใหม่ได้เป็น

$$\hat{g}_i u_{1(2)} = g_p(\tau) \left(u_{1(2)} + \frac{T_2^2}{T_0^2} \frac{\partial^2 u_{1(2)}}{\partial \tau^2} \right) \quad (2.71)$$

พิกเกน (Peak Gain) ที่ขึ้นกับเวลาเป็นผลมาจากการอิ่มตัวของเกน สามารถหาได้จาก

$$\frac{\partial g_p}{\partial \tau} = \frac{g_0 - g_p}{T_1/T_2} - \frac{g_p P_0 T_0}{E_S} |u_{1(2)}(\tau)|^2 \quad (2.72)$$

โดย g_0 คือเกนที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Gain) ขึ้นกับระดับของการปั๊ม (Pumping Level) T_1 เป็นเวลาการคลายตัวของประชากร (Population Decay Time) โดย $T_1 \sim 1 \text{ ms}$ E_S คือพลังงานของพัลส์ขณะอิ่มตัว (Saturation Energy) โดยปกติมีค่า $E_S \sim 1 \mu\text{J}$ สำหรับ EDFA และ T_0 คือความกว้างของอินพุตพัลส์ (Input Pulse Width) และ $P_0 = (-A_{eff} \lambda k / 2\pi n_2 T_0^2) |A|^2$ คือพิกกำลังงานของอินพุต

พัลส์ เมื่อ A คือ นอร์มอลไลซ์แอมพลิจูดของอินพุตพัลส์ A_{eff} คือแอฟเฟกทีฟคอร์แอร์เรีย (Effective Core Area) โดยส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติค่า T_0 จะน้อยกว่าค่า T_1 มาก เราสามารถละทิ้งเทอมกลางของสมการ (2.72) ได้ตั้งนั้นจากสมการ(2.72) จะได้ว่า

$$g_p(\tau) = g_0 \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_{1(2)}(\tau)|^2 d\tau] \quad (2.73)$$

เมื่อ $s = T_0 P_0 / E_s$ เป็นการนิยามพารามิเตอร์การอิ่มตัว (Gain Saturation Parameter) เป็นปริมาณที่วัดความแตกต่างระหว่างพลังงานของอินพุตพัลส์ (Input Pulse Energy) และ พลังงานการอิ่มตัว (Saturation Energy) โดยปกติสำหรับโซลิตอนพื้นฐาน ($N=1$) ปริมาณ $s \sim 10^{-5}$ นั่นคือ ผลการอิ่มตัวของเกนนี้สามารถตัดทิ้งได้สำหรับการขยายโซลิตอนพื้นฐาน แทนสมการ (2.73) และ สมการ (2.71) พร้อมกำหนด สัมประสิทธิ์เกนเชิงเส้น (Linear Gain Coefficient) มีค่าเป็น $\Gamma = g_0 L_D / 2$ และ เกนแบนด์วิดท์ (Gain Bandwidth) หรือ การกระจายของเกน (Gain Dispersion) มีค่าเป็น $\mu = \Gamma (T_2^2 / T_0^2)$ นำไปแทนลงในสมการที่ (2.65) ถึง (2.67) จะได้สมการในรูปทั่วไปสำหรับงานวิจัยนี้มีค่าเป็น

สำหรับแบบจำลอง Two-cores coupler :

$$\begin{aligned} j \frac{\partial u_1}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa u_2 - |u_1|^2 u_1 + j(\Gamma u_1 + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_1(\tau)|^2 d\tau] \\ j \frac{\partial u_2}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa u_1 - |u_2|^2 u_2 + j(\Gamma u_2 + \mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_2(\tau)|^2 d\tau] \end{aligned} \quad (2.74)$$

สำหรับแบบจำลอง Three-cores coupler array :

$$\begin{aligned} j \frac{\partial u_1}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa u_2 - |u_1|^2 u_1 + j(\Gamma u_1 + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_1(\tau)|^2 d\tau] \\ j \frac{\partial u_2}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_3) - |u_2|^2 u_2 + j(\Gamma u_2 + \mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_2(\tau)|^2 d\tau] \\ j \frac{\partial u_3}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2} - \kappa u_2 - |u_3|^2 u_3 + j(\Gamma u_3 + \mu \frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_3(\tau)|^2 d\tau] \end{aligned} \quad (2.75)$$

สำหรับแบบจำลอง Triangular three-cores coupler :

$$\begin{aligned}
 j \frac{\partial u_1}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2} - \kappa(u_2 + u_3) - |u_1|^2 u_1 + j(\Gamma u_1 + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_1(\tau)|^2 d\tau] \\
 j \frac{\partial u_2}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_3) - |u_2|^2 u_2 + j(\Gamma u_2 + \mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_2(\tau)|^2 d\tau] \\
 j \frac{\partial u_3}{\partial \xi} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2} - \kappa(u_1 + u_2) - |u_3|^2 u_3 + j(\Gamma u_3 + \mu \frac{\partial^2 u_3}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_3(\tau)|^2 d\tau]
 \end{aligned}
 \tag{2.76}$$

จาก 2.74 ถึง 2.76 จะได้ค่าเกนโอเปอร์เรเตอร์ \hat{G}_i ที่กระทำการโอเปอร์เรตสำหรับกรณีนี้คือ

$$\hat{G}u_i = (\Gamma u_i + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial \tau^2}) \exp[-s \int_{-\infty}^{\tau} |u_i(\tau)|^2 d\tau]
 \tag{2.77}$$

สมการที่ 2.74 ถึง 2.76 เป็นสมการแบบจำลองทั่วไปที่ใช้อธิบายการเคลื่อนตัวของพัลส์ที่ความกว้างแคบๆ ในคัปเปิลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียม หรือ โซลิตอนสวิตชิงในคัปเปิลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียม ซึ่งรวมผลของการอิมพัลส์ของเกนและการกระจายของเกน เราสามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีต่างๆ ดังนี้ กรณีเกนแบนด์วิดท์มีค่าไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth) ผ่านพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การขยายเชิงเส้น (Linear Gain Coefficients, Γ) กรณีเกนแบนด์วิดท์มีค่าจำกัด (Finite Gain Bandwidth) ผ่านพารามิเตอร์การกระจายของเกน (Gain Dispersion, μ) และกรณีเกิดการอิมพัลส์ของเกนผ่านพารามิเตอร์การอิมพัลส์ของเกน (Gain Saturation, s)

สำหรับกรณีคิดผลของ Γ อย่างเดียว ส่วน $\mu = s = 0$ จะเป็นกรณีเกนแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth) แต่ถ้าคิดผลของ Γ และ μ ส่วน $s = 0$ จะเป็นกรณีเกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth) ดังได้กล่าวมาแล้ว

ปริมาณส่วนใหญ่ในการคำนวณเป็นปริมาณไม่มีหน่วย (Dimensionless) หากต้องการปริมาณจริงก็สามารถทำได้จากสูตรที่เกี่ยวข้อง ค่าตอบขาออกในแต่ละแกนสามารถแสดงโดยค่าการส่งผ่านสัญญาณ (Transmission) สำหรับการคำนวณนี้เราเลือก พิจารณาความยาวคัปเปิลอร์ที่ระยะทางที่เป็นครึ่งหนึ่งของความยาวบีต (Half-Beat-length, L_c) สำหรับหลักการทํางานของการสวิตชิงกำลังของโซลิตอน หรือ โซลิตอนสวิตชิง อาจพิจารณาได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 2.3.2

2.9 ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบีต (Half-Beat Length) [1,2,3,4,5,7]

เราจะพิจารณาเฉพาะที่ความยาวคัปเปิลเลอร์เป็นครึ่งหนึ่งของความยาวบีต (Half-Beat Length, L_c) ในคัปเปิลเลอร์ใยแก้วนำแสงไม่เชิงเส้นหลายแกนคือ ระยะที่เมื่ออินพุตสัญญาณไปยังแกนใดแกนหนึ่ง แล้วทำให้สัญญาณนั้นถูกถ่ายทอดไปยังแกนอื่นเกือบสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น ครึ่งหนึ่งของความยาวบีตในคัปเปิลเลอร์ใยแก้วนำแสงไม่เชิงเส้นสองแกน คือ $L_c = \pi/2K$ ส่วนคัปเปิลเลอร์ใยแก้วนำแสงไม่เชิงเส้นสามแกนแบบอะเรย์ และแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า คือ $L_c = \pi/\sqrt{2}k$ และ $L_c = \pi/3K$ ตามลำดับเมื่อ K คือสัมประสิทธิ์การคัปปลิงเชิงเส้นซึ่งเป็นค่าคงที่ และเป็นตัวแทนการรบกวนของคลื่นระหว่างแกนหรือเกิดการคัปปลิงของกำลังของสัญญาณระหว่างคัปเปิลเลอร์ พารามิเตอร์ตัวนี้ในความหมายทางด้านฟิสิกส์หมายความว่าระยะห่างระหว่างแกน ถ้าสัมประสิทธิ์ในการคัปปลิงเชิงเส้นมีค่ามาก แสดงว่าระยะห่างระหว่างแกนใกล้กันมาก โดยปกติช่วงของสัมประสิทธิ์ในการคัปปลิงเชิงเส้นอยู่ในช่วง $0 < \kappa \leq 1$ จากสมการข้างต้นแสดงว่า ครึ่งหนึ่งของความยาวบีตขึ้นกับสัมประสิทธิ์ในการคัปปลิงเชิงเส้น โดยที่ถ้าสัมประสิทธิ์ในการคัปปลิงเชิงเส้นมีค่ามาก ค่าครึ่งหนึ่งของความยาวบีตจะมีระยะที่สั้นลง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าทำให้กำลังการสวิตชิง (Switching Power, P_s) ซึ่งเป็นกำลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะการสวิต มีค่ามากตามไปด้วย

2.10 วิธีการทางตัวเลข (Numerical Method)

สมการที่ (2.63) เป็นสมการชเรอดิงเงอร์ไม่เชิงเส้นที่ไม่มี การคัปปลิง เป็นสมการเดียว และสามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธีการกระเจิงกลับ แต่ถ้าเราต้องการคิดผลจากการรบกวน หรือเป็นระบบสมการ CNLS จะไม่เป็นการง่ายที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ ดังนั้นวิธีที่ดีกว่าและสะดวกกว่าก็คือวิธีการทางตัวเลข โดยเฉพาะกับการแก้ระบบสมการ CNLS ในการคัปปลิงเหล่านี้ซึ่งเป็นการง่ายต่อการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ วิธีทางตัวเลขสำหรับการแก้ระบบสมการเหล่านี้มีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method, FDM) วิธีการบีมพรอเพเกชัน (Beam Propagation Method, BPM) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และ เมธอดออฟไลน์ (Method Of Lines, MOL) [11] ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้ และกล่าวถึงเพียง เมธอดออฟไลน์ ซึ่งเป็นวิธีการทางตัวเลขที่ใช้กันโดยทั่วไปในการแก้ปัญหาของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation, PDEs) และเป็นวิธีที่สามารถเข้าใจได้ง่าย

2.11 เมธอดออฟไลน์ (Method Of Lines, MOL) [11]

มีหลักการพื้นฐานคือ การอินทิเกรตระบบของสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations, ODEs) ซึ่งระบบสมการอนุพันธ์นี้ได้มาจากการประมาณค่าของระบบ

สมการอนุพันธ์ย่อยที่เราสนใจ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า MOL เป็นวิธีที่ใช้การประมาณค่าแบบผลต่างสี่เหลี่ยมเนื่องกับอนุพันธ์อันดับสองของตำแหน่ง (Spatial Derivatives) หรือเวลา (Temporal) ของ PDEs ทำให้ได้มาซึ่งระบบสมการอนุพันธ์สามัญของตำแหน่งหรือเวลา ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้ตัวอินทิเกรตมาตรฐานทั่วไป

เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นขอยกตัวอย่างการใช้ MOL ในปัญหาการแพร่ 1 มิติ (One-dimensional Fourier's second law) ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.78)$$

เราสามารถแทนอนุพันธ์ทางตำแหน่ง (Spatial derivative) ด้านขวามือของสมการ(2.78) ด้วยการประมาณค่าผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Approximation) ดังนั้นเราจะได้

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u(x + \Delta x, t) - 2u(x, t) + u(x - \Delta x, t)}{\Delta x^2} \quad (2.79)$$

สมการ (2.79) นี้ขึ้นกับตัวแปร t อย่างเดียว นั่นคือเราสามารถพิจารณาเป็นสมการอนุพันธ์สามัญที่ขึ้นกับตัวแปร t ได้ ในทางปฏิบัติเราอ้างค่าของ x เป็น grid index i ดังนั้นสมการ (2.79) สามารถเขียนได้แทนด้วย

$$\frac{du_i(t)}{dt} = \frac{u_{i+1}(t) - 2u_i(t) + u_{i-1}(t)}{\Delta x^2} \quad (2.80)$$

สมการ (2.80) เป็นตัวแทนของระบบสมการอนุพันธ์สามัญ ตลอดแนวของ x เมื่อ

$$xL \leq x \leq xU; x = xL + (i - 1)\Delta x, i = 1, 2, \dots, N$$

และ N คือจำนวนของ Spatial grid points ของ x โดย

$$I=1: x=xL+0\Delta X=xL$$

$$I=2: x=xL+1\Delta X$$

$$I=3: x=xL+2\Delta X$$

.....

$$I=N-1: x=xL+(N-2)\Delta X$$

$$I=N: x=xL+(N-1)\Delta X=xU$$

ดังนั้นจะได้ระบบสมการอนุพันธ์สามัญของตัวแปร t ที่สามารถใช้ตัวอินทิเกรตที่เป็นมาตรฐานในการอินทิเกรตได้ แต่สมการเหล่านี้ต้องการหนึ่งเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) และ สองเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ดังเช่น

$$u(x, 0) = \sin(\pi x), 0 \leq x \leq 1 \quad (2.81)$$

$$u(0, t) = u(1, t) \quad (2.82)$$

โดยการกำหนดให้ $X_L=0, X_U=1$ และรวมสมการ (2.80) ถึง (2.82) จะได้

$$\frac{du_1}{dt} = 0, u_1(0, 0) = 0 \quad (2.83)$$

$$\frac{du_2}{dt} = \frac{u_3 - 2u_2 + u_1}{\Delta x^2}, u_2(\Delta x, 0) = \sin(\pi \Delta x) \quad (2.84)$$

$$\frac{du_3}{dt} = \frac{u_4 - 2u_3 + u_2}{\Delta x^2}, u_3(2\Delta x, 0) = \sin(2\pi \Delta x) \quad (2.85)$$

.....

$$\frac{du_{N-1}}{dt} = \frac{U_N - 2U_{N-1} + U_{N-2}}{\Delta X^2}, U_{N-1}((N-2)\Delta X, 0) = \text{SIN}(\pi(N-2)\Delta X) \quad (2.86)$$

$$\frac{du_N}{dt} = 0, u_N(1, 0) = 0 \quad (2.87)$$

สมการที่ (2.83) ถึง (2.87) นี้เป็นแบบอย่างทั่วไปของ เมชคอปโพลี ซึ่งสามารถแก้หาคำตอบได้ด้วยตัวอินทิเกรตมาตรฐานทั่วไป เช่น RKF45 หรือ ODE45 ของเมทแลบ (MATLAB) เป็นต้น ส่วนคำตอบที่ได้ก็คืออุณหภูมิตามจุดต่อที่ทำการแบ่ง Δx เวลาใดๆ เรานำหลักการเมชคอปโพลีนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบสมการที่มีการกัปปลิง หรือ สมการ 2.75 ถึง 2.77 โดยทำการประมาณค่าเทอมอนุพันธ์ย่อยอันดับสองของระบบสมการดังกล่าว ด้วยผลต่างๆสี่บเนื่อง (Finite Different) และทำการอินทิเกรตระบบสมการอนุพันธ์สามัญด้วยตัวอินทิเกรตมาตรฐาน โดยคำตอบที่ได้จะเป็นค่าของแอมพลิจูดของพัลส์โซลิตอนเพื่อพิจารณานำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

2.12 ประสิทธิภาพในการสวิตทางแสง

พารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้วัดประสิทธิภาพในการสวิตทางแสง คือค่าการส่งผ่านสัญญาณ (Transmission) โดยเมื่อมีการส่งสัญญาณอินพุตเข้าในคัปเปิลอร์ก็จะมีค่าการส่งผ่านกำลังงานไปที่แกนอื่นๆ ของคัปเปิลอร์ นอกจากนั้นค่าส่งผ่านสัญญาณยังเป็นตัวบอกค่าสัญญาณการรบกวนข้าม

ช่อง (Crosstalk) โดยเมื่อพิจารณาขณะมีการสวิตที่แกนหนึ่ง ของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน ดังนั้นค่า
 สัญญาณการรบกวนจะอยู่แกนที่สอง ค่าการส่งผ่านสัญญาณโดยคำนวณได้ดังนี้
 ค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย (Average Transmission):

$$T_i(\xi) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |u_i(\xi = Lc, \tau)|^2 d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} (|u_1(\xi = 0, \tau)|^2 + |u_2(\xi = 0, \tau)|^2 + |u_3(\xi = 0, \tau)|^2) d\tau} \quad (2.88)$$

ค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalised Transmission):

$$T_i(\xi) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |u_i(\xi = Lc, \tau)|^2 d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} (|u_1(\xi = Lc, \tau)|^2 + |u_2(\xi = Lc, \tau)|^2 + |u_3(\xi = Lc, \tau)|^2) d\tau} \quad (2.89)$$

เป็นสมการสำหรับกรณีคัปเปิลอร์ชนิดสามแกน แต่สำหรับคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนให้ละ
 เเทมที่มี U_3 เมื่อ $i = 1, 2, 3$ แทนแกนที่หนึ่ง สอง และ สาม ของคัปเปิลอร์ตามลำดับ ปริมาณ
 $\int_{-\infty}^{\infty} |u_i(\xi, \tau)|^2 d\tau$ ที่ปรากฏในสมการก็คือ ค่าพลังงานของพัลส์โซลิตอนซึ่งถ้าไม่มีการโคปพลังงาน
 ของพัลส์โซลิตอนรวมกันทุกแกนที่อินพุตต้องเท่ากับเมื่อรวมกันทุกแกนของเอาต์พุตเมื่อ ไม่เกิดการ
 สูญเสีย (Loss) แต่ถ้าในกรณีคัปเปิลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมค่าพลังงานรวมของอินพุตกับเอาต์พุต
 จะไม่เท่ากันตลอดการเคลื่อนตัว อันเป็นผลมาจากอัตราขยายของตัวกลางที่เกิดกับพัลส์โซลิตอน ถ้า
 ไม่มีการอิมตัวของแกน ค่าพลังงานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆตามระยะที่มันเคลื่อนที่ ดังนั้นสำหรับ
 กรณีคัปเปิลอร์ที่ไม่มีการโคปค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยจะเท่ากับค่าการส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำ
 การนอร์มอลไลซ์ และค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยจะไม่เกินหนึ่ง แต่ถ้ากรณีมีการโคปค่าการส่งผ่าน
 สัญญาณเฉลี่ยจะเกินหนึ่งได้แต่ค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์จะยังคงไม่เกินหนึ่ง
 ดังนั้นหากต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสวิตในแง่ความคมชัดด้วยค่าอัตราขยายหรือความ
 ยาวคัปเปิลอร์ที่แตกต่างกันให้ทำการพิจารณาด้วยค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ แต่
 หากต้องการพิจารณาการขยายสัญญาณให้ดูที่ค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย ค่าการส่งผ่านสัญญาณที่
 กล่าวนี้จะถูกใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน เพื่อพิจารณาพารามิเตอร์ใช้งาน
 สวิตซึ่งสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ทางแสงความเร็วสูงต่อไป

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

ในที่นี้เป็นการแสดงขั้นตอนการวิจัยโดยจะศึกษาคุณสมบัติการสวิตของ โซลิตอน (Soliton Switching Properties) ในคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงที่โดปด้วยเออร์เบียม (Erbium-Doped Fiber Coupler) โดยจะพิจารณาค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย (Average Transmission) และ ค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalised Transmission) กับ ค่าพิกกำลังงานอินพุต (Input Peak Power) เพื่อพิจารณาเลือกชนิดของคัปเปิลอร์ กำลังงานการสวิต (Switching Power) อัตราขยายที่ใช้ ระยะใกล้ไกล แกน ความยาวคัปเปิลอร์ (Coupler Length) และความกว้างของอินพุตพัลส์ (Pulse Width) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณ (Compression Factor) และประสิทธิภาพในการสวิตของโซลิตอน โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณา ความยาวคัปเปิลอร์ (Coupler Length, L_c) ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต (Half-Beat-Length) โดย $L_c = \pi/2K$ สำหรับกรณี คัปเปิลอร์ชนิดสองแกน (Two-Core Coupler) $L_c = \pi/\sqrt{2}k$ สำหรับในกรณี คัปเปิลอร์ชนิดสามแกนชนิดอะเรย์ (Three-Core Coupler Array) และ $L_c = \pi/3k$ สำหรับกรณี คัปเปิลอร์สามแกนชนิดสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triangular Three-Core Coupler) โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นดังนี้ กรณีเกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth) โดยผ่านพารามิเตอร์ (Parameter) สัมประสิทธิ์การขยายเชิงเส้น (Linear Gain Coefficients, Γ) ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับการบีบของเลเซอร์ที่ป้อนให้กับคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงที่โดปด้วยเออร์เบียม กรณีเกนแบนด์วิดท์มีค่าจำกัด (Finite Gain Bandwidth) อันเนื่องจากองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุตได้รับอัตราขยายที่ไม่เท่ากัน โดยเกี่ยวข้องกับความกว้างของอินพุตพัลส์ผ่านพารามิเตอร์การกระจายของเกน (Gain Dispersion, μ) และในท้ายสุดเป็นการศึกษาการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation) ผ่านพารามิเตอร์ s นอกจากนี้ยังศึกษาระยะใกล้ไกลระหว่างแกนของคัปเปิลอร์และความยาวคัปเปิลอร์ซึ่งอธิบายด้วยพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การคัปปลิงเชิงเส้น (Linear Coupling Coefficients, K) สัดส่วนการบีบอัดสัญญาณ (Compression Factor) และประสิทธิภาพในการสวิตของโซลิตอน โดยหน่วยที่ใช้แทบทั้งหมดในการวิจัยเป็นจำนวนไร้มิติ (Dimensionless Number) ถ้าต้องการหน่วยที่ใช้จริงก็สามารถคำนวณกลับโดยอาศัยความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง ท้ายที่สุดมีความเป็นไปได้ที่จะนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถสวิต บีบอัด และขยายสัญญาณทางแสงด้วยความเร็วสูงได้ด้วยอุปกรณ์เพียงตัวเดียว

งานวิจัยนี้ประมวลผลโดยใช้โปรแกรมเมทแลบ (MATLAB) กระทำบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ทำการวิเคราะห์โดยเมธอดคอปไลน์ (Method Of Line, MOL)[11] ที่ความละเอียด 512 จุดในแกนมิติของเวลา (Time Dimension) และประมาณค่าของอนุพันธ์อันดับสองด้วยผลต่างสี่เหลี่ยมแบบห้าจุด (Five Point Finite Difference) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition, B.C.) ดังนี้

$$\frac{\partial u_1}{\partial \tau}(\xi, \tau) = \frac{\partial u_2}{\partial \tau}(\xi, \tau) = \frac{\partial u_3}{\partial \tau}(\xi, \tau) = 0,$$

$$u_1(\xi, \tau = -\infty) = u_1(\xi, \tau = \infty) = 0,$$

$$u_2(\xi, \tau = -\infty) = u_2(\xi, \tau = \infty) = 0,$$

$$u_3(\xi, \tau = -\infty) = u_3(\xi, \tau = \infty) = 0$$

โดเมนปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นช่วงของ τ โดยใช้ช่วง $-10 \leq \tau \leq 10$, $0 \leq \xi \leq Lc$ ($Lc =$ ระยะ ครึ่งหนึ่งของความยาวบิต) ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตของงานวิจัยนี้มีค่าเป็นดังนี้

$$\frac{\partial u_1}{\partial \tau} = \frac{\partial u_2}{\partial \tau} = \frac{\partial u_3}{\partial \tau} = 0,$$

$$u_1(\xi, \tau = -10) = u_2(\xi, \tau = 10) = 0,$$

$$u_2(\xi, \tau = -10) = u_2(\xi, \tau = 10) = 0,$$

$$u_3(\xi, \tau = -10) = u_3(\xi, \tau = 10) = 0$$

สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition, I.C.) ใช้สัญญาณพัลส์อินพุตเป็นโซลิตอนในแกนที่ 1 ของคัปเปิลอร์ มีค่าเป็นดังนี้

สำหรับสองแกน :

$$u_1(\xi = 0, \tau) = \sqrt{P_{\max}} \operatorname{sech}(\tau)$$

$$u_2(\xi = 0, \tau) = 0$$

สำหรับสามแกน :

$$u_1(\xi = 0, \tau) = \sqrt{P_{\max}} \operatorname{sech}(\tau)$$

$$u_2(\xi = 0, \tau) = u_3(\xi = 0, \tau) = 0$$

ขั้นตอนการทดสอบแบ่งออกเป็น 6 หัวข้อใหญ่ดังนี้

3.1 การทดสอบโปรแกรมเบื้องต้น

3.1.1 การศึกษาระยะเวลาคัปปลิงของคัปเปลอร์

ในที่นี้เป็นทดสอบ โปรแกรมด้วยการศึกษาลักษณะรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัว ในคัปเปลอร์ทั้งสามชนิด กรณีไม่มีการโคป โดยจะศึกษาระยะเวลาครึ่งหนึ่งของความยาวบิต และระยะเวลา ความยาวบิต ทำการทดสอบที่ระยะคัปปลิงเท่ากับสี่เท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวบิตของคัปเปลอร์แต่ละชนิด โดยเลือกพิกกำลังงานอินพุตเท่ากับ 1 ($\Gamma = \mu = s = 0$, $K = 1$)

3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปลอร์ที่ไม่มีการโคป

ในที่นี้เป็นทดสอบ โปรแกรมที่เขียนขึ้นกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยศึกษาค่าการส่งผ่าน สัญญาณของคัปเปลอร์ที่ไม่มีการ โคป กับ ค่าพิกกำลังงานขาเข้าของคัปเปลอร์ทั้งสามชนิด พิจารณาที่ ระยะเวลาครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($\Gamma = \mu = s = 0$, $K = 1$)

3.1.3 การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปลอร์ชนิดสองแกนที่มีการโคปกรณีเอนแบนด์วิดธ์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth)

เป็นการทดสอบ โปรแกรมที่เขียนขึ้นกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ ค่าพิกกำลังงานอินพุต ที่แกนที่ 1 โดยเปรียบเทียบกันระหว่างกรณี มีการโคป โดยพิจารณาที่อัตราขยาย $\Gamma = 0.15$ และ กรณีไม่มีการโคป $\Gamma = 0$ ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25$, $\mu = s = 0$) นอกจากนี้ยังทดสอบค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงานอินพุต ที่แกนที่ 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25$, $\mu = s = 0$)

3.1.4 การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปลอร์ชนิดสองแกนที่มีการโคปกรณีเอนแบนด์วิดธ์จำกัด (Finite Gain Bandwidth)

เป็นการทดสอบโปรแกรมที่เขียนขึ้นกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยแสดงความสัมพันธ์ค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุต ที่แกนที่ 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าของ μ เมื่อ Γ มีค่าเท่ากับ 0.15 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25$, $s = 0$)

3.2 การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลอร์ที่มีการโคปกรณีเกินแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth)

3.2.1 การศึกษาเกินแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัดที่ส่งผล ต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน

เป็นการศึกษาเพื่อพิจารณาผลของเกินแบนด์วิดท์ที่ไม่จำกัดที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ในการสวิตสัญญาณโซลิตอนในคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิด โดยพิจารณา ความคมชัดของสัญญาณ กำลังงานในการสวิตสัญญาณ เปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย รวมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสวิต โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณ กับ พิกกำลังงานอินพุต เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ Γ ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \mu = s = 0$) นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะรูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์สำหรับค่ากำลังงานอินพุตที่ต่ำและสูงกว่ากำลังการสวิตของโซลิตอนของคัปเปิลอร์แต่ละชนิด โดยเลือกพิจารณาที่ $\Gamma = 0.15$

3.2.2 การศึกษาเกินแบนด์วิดท์ไม่จำกัดที่ส่งผลต่อรูปสัญญาณโซลิตอนในคัปเปิลอร์

เป็นการศึกษารูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่มีการเคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิดอันเนื่องจากผลของเกินแบนด์วิดท์ไม่จำกัด พิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างไม่มีการโคป ($\Gamma = 0$) และมีการโคป ($\Gamma = 0.15$) ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \mu = s = 0$)

3.3 การศึกษาการปรับเปลี่ยนความยาวของคัปเปิลอร์ที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบิต

เป็นการศึกษาปรับเปลี่ยนความยาวของคัปเปิลอร์กรณีเกินแบนด์วิดท์ไม่จำกัดเพื่อดูผลเปรียบเทียบกับหัวข้อ 3.2.1 โดยพิจารณาค่ากำลังงานการสวิต ความคมชัดของสัญญาณ และ เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย โดยแสดงสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณ กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิด ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ Γ พิจารณาที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 0.5, \mu = s = 0$)

3.4 การศึกษาสัดส่วนการบีบอัดตัวของสัญญาณเนื่องจากเกินแบนด์วิดท์มีค่าไม่จำกัด

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณ กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ของคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิด ที่เกิน 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ พิจารณาที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \mu = s = 0$) โดยสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณคำนวณได้จาก

$$\text{Compression factor} = \tau_{(\text{FWHM}, \text{input})} / \tau_{(\text{FWHM}, \text{output})}$$

3.5 การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปอเรอร์ที่มีการโคปกรณีแบนด์วิดท์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth)

3.5.1 การศึกษาแบนด์วิดท์ที่จำกัด ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน

เป็นการศึกษาผลของแบนด์วิดท์ที่จำกัดที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิต โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปอเรอร์ทั้งสามชนิด โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$)

3.5.2 การศึกษาแบนด์วิดท์ที่จำกัดต่อรูปสัญญาณโซลิตอนในคัปเปอเรอร์ที่มีการโคป

เป็นการศึกษาลักษณะรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปอเรอร์ทั้งสามชนิด อันเนื่องจากผลของแบนด์วิดท์ที่จำกัด โดยพิจารณาเปรียบเทียบในกรณีไม่มีผลของแบนด์วิดท์ที่จำกัด ($\mu = 0$) และมีผลของแบนด์วิดท์ที่จำกัด ($\mu = 0.05$) ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$)

3.6 การศึกษาการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation)

3.6.1 การศึกษาการอิ่มตัวของเกนที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน

เป็นการศึกษาผลจากการอิ่มตัวของเกนที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิต โซลิตอน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปอเรอร์ทั้งสามชนิด ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ s พิจารณาที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$)

3.6.2 การศึกษาการอิ่มตัวของเกน ที่ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณ

เป็นการศึกษารูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปอเรอร์ทั้งสามชนิด อันเนื่องจากการอิ่มตัวของเกน โดยพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีไม่มีอิ่มตัวของเกน ($s = 0$) และกรณีมีการอิ่มตัวของเกน ($s = 1$) ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$)

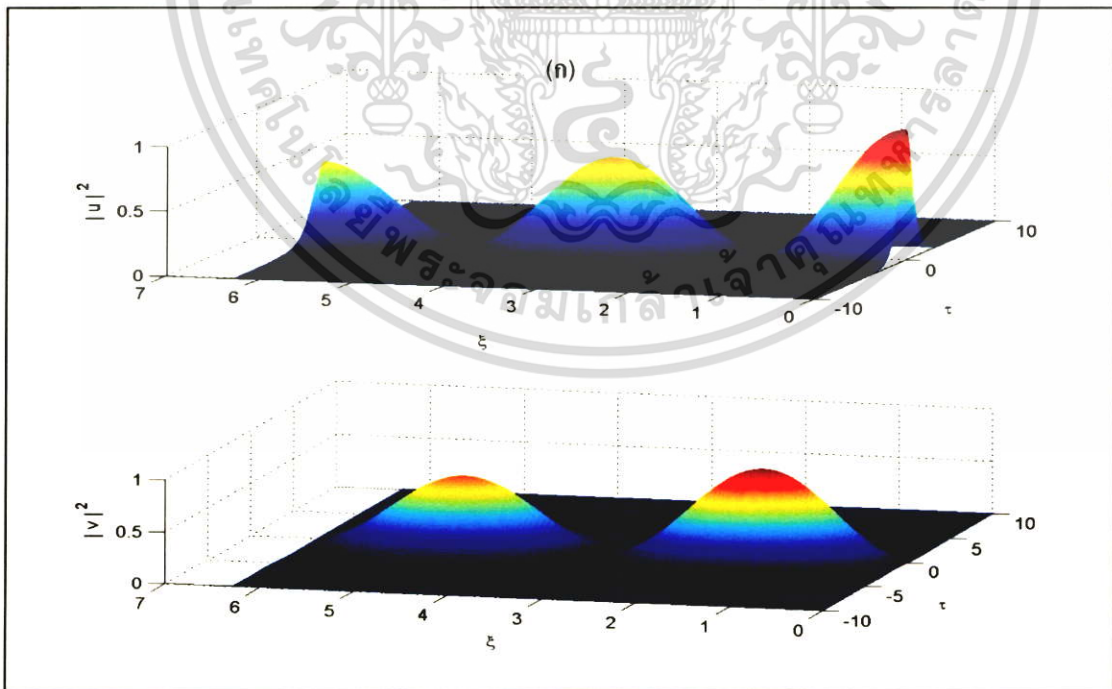
บทที่ 4

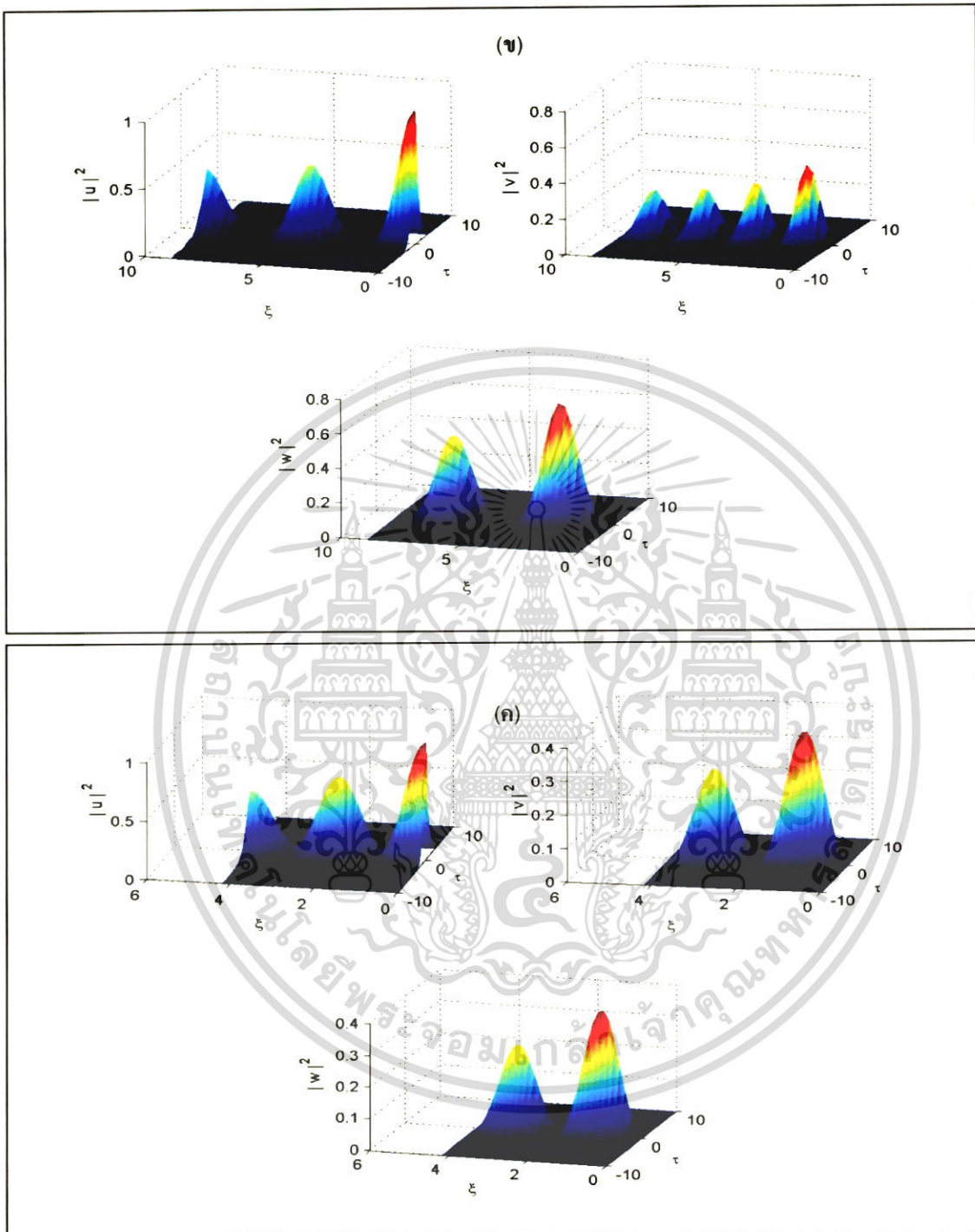
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในที่นี้เป็นผลการวิจัยคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน (Soliton Switching Properties) ในคัปเปิลอร์ใยแก้วนำแสงที่โด๊ปด้วยเออร์เบียม (Erbium-Doped Fiber Coupler) โดยจะพิจารณาค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย (Average Transmission) และ ค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalised Transmission) กับ ค่าพีคกำลังงานอินพุต (Input Peak Power) เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกชนิดของคัปเปิลอร์ กำลังงานที่ใช้สวิตสัญญาณ (Switching Power) อัตราขยายของอุปกรณ์ (Device Gain) ระยะโกล์ไกสแกน ความยาวคัปเปิลอร์ (Coupler Length) และความกว้างของอินพุตพัลส์ (Pulse Width) ที่ต้องใช้นอกจากนั้นยังรวมถึงการศึกษาสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณ (Compression Factor) และประสิทธิภาพในการสวิตของโซลิตอน

4.1 ผลการทดสอบโปรแกรมเบื้องต้น

4.1.1 ผลการศึกษาระยะคัปปลิงของคัปเปิลอร์

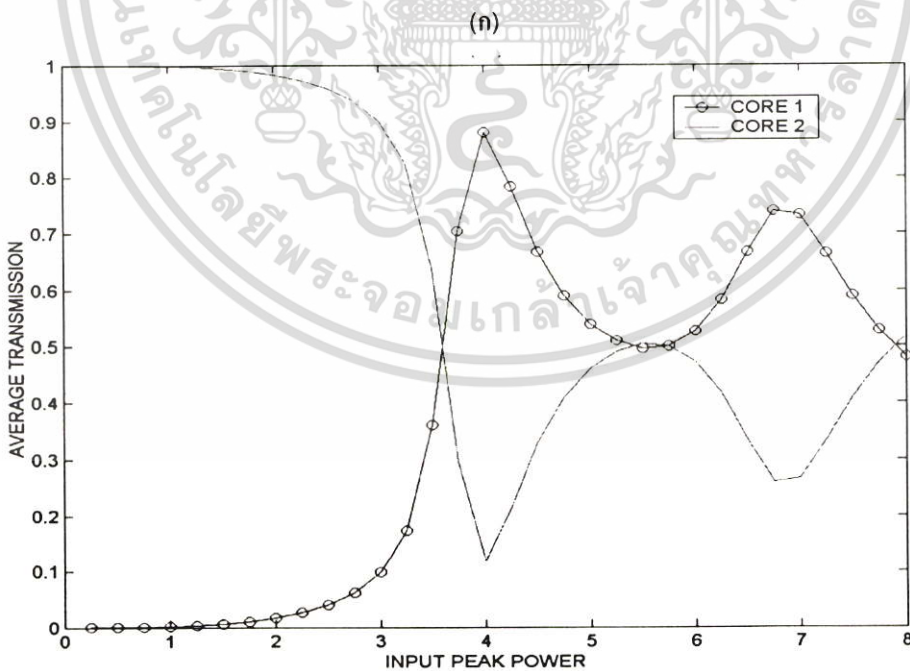


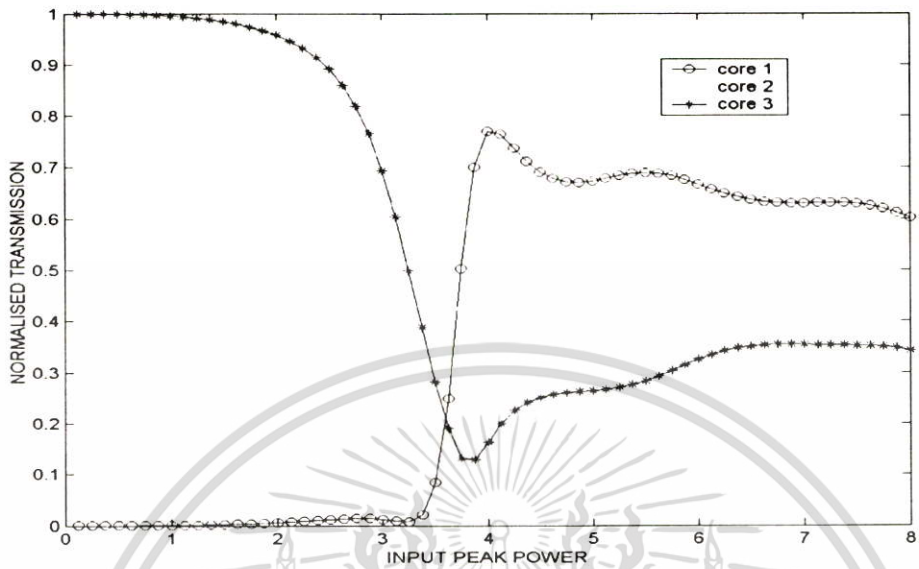


รูปที่ 4.1 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิด กรณีไม่มีการโคป (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ ระยะคัปปลิงเท่ากับสี่เท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวบีตของแต่ละกรณี เมื่อพิกัดกำลังงานอินพุต เท่ากับ 1 ($\kappa=1$, $\Gamma=\mu=s=0$)

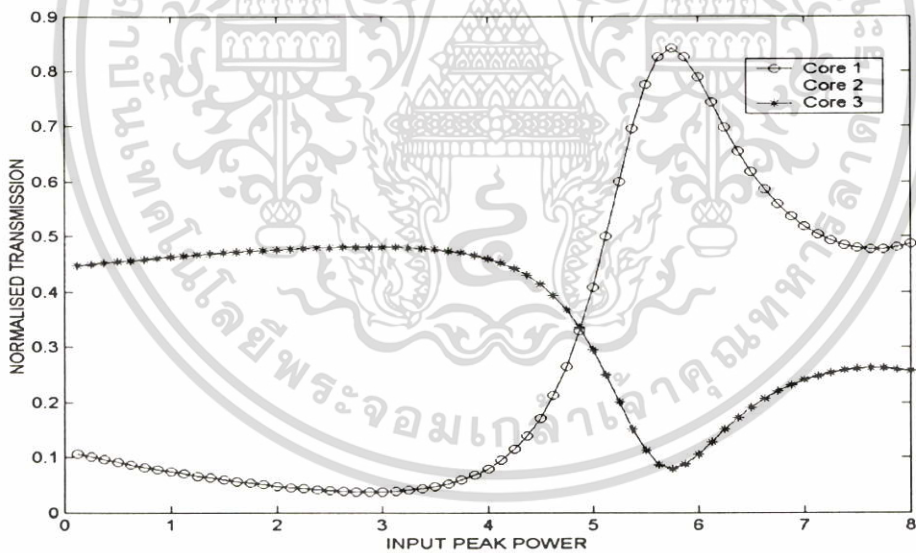
จากรูป 4.1 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ที่ใช้กำลังงานอินพุตค่าต่ำ โดยในที่นี้คัปเปิลอร์จะแสดงความเป็นคัปเปิลอร์เชิงเส้น (Linear Coupler) มีลักษณะการส่งถ่ายกำลังงานกลับไปมาหรือเกิดการออสซิลเลต (Oscillate) ระหว่างแกนซึ่งตรงกับหลักครึ่งหนึ่งของความยาวบีต (Half-Beat-Length) สำหรับ $K=1$ กำลังงานถูกส่งถ่ายสูงสุดไปแกนสองใช้ระยะสั้นสุดเท่ากับ $L_c = \pi/2$ สำหรับกรณี คัปเปิลอร์ชนิดสองแกน กำลังงานถูกส่งถ่ายสูงสุดไปแกนสามใช้ระยะสั้นสุดเท่ากับ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ สำหรับในกรณี คัปเปิลอร์ชนิดสามแกนชนิดอะเรย์ และกำลังงานถูกส่งถ่ายสูงสุดไปแกนสามเมื่อระยะสั้นสุดเท่ากับ $L_c = \pi/3$ สำหรับกรณี คัปเปิลอร์สามแกนชนิดสามเหลี่ยมด้านเท่า เมื่อเลขระยะนี้ไปอีกหนึ่งเท่าตัวจะเป็นระยะความยาวบีต (Beat-Length) ซึ่งเป็นระยะที่ถ่ายกำลังงานไปแกนอื่นอย่างสมบูรณ์โดยค่ากำลังงานจะลดลงจนเป็นศูนย์ในแกนสองหรือสาม เป็นการสิ้นสุดการส่งผ่านกำลังงานในครั้งแรกของการออสซิลเลต จากความยาวคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิดจะเห็นได้ว่าคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าจะสั้นที่สุด และคัปเปิลอร์ที่ยาวที่สุดคือชนิดสามแกนอะเรย์ ส่วนค่า K ที่มากจะหมายถึงการคัปปลิงที่รุนแรงระหว่างแกน(วางใกล้กันมากขึ้น) มากกว่า ดังนั้นจะใช้ระยะที่สั้นกว่าในการถ่ายทอดพลังงานไปแกนข้างเคียงหรือระยะครึ่งหนึ่งความยาวบีตจะสั้นกว่ากรณีค่า K ค่าน้อย

4.1.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลอร์ที่ไม่มีกรโคป





(ข)

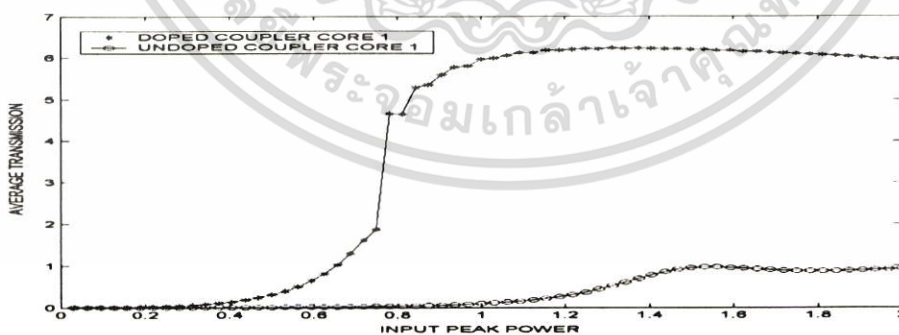


(ค)

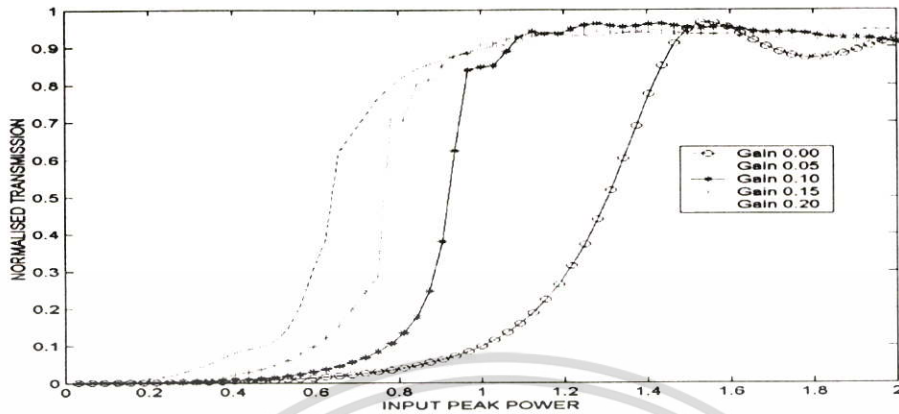
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านสัญญาณของคัปเปลอร์ที่ไม่มีการโคป กับ ค่าพิกกำลังงานขาเข้า (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1$, $\Gamma = \mu = s = 0$)

จากผลการทดสอบดังรูป 4.2 โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นให้ผลสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลของ Soto-Crespo และ Wright ที่ใช้ระเบียบวิธีแยกลำดับขั้นตอน(Split-Step Method) เป็นอย่างดี [2] โดยเมื่อเปรียบเทียบที่แกน 1 และแกน 3 ของคัปเปิลอร์แบบสามแกน กับ แกน 1 และ แกน 2 ของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน จะเห็นว่าคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ จะมีลักษณะกราฟของค่าการส่งผ่านสัญญาณที่มีความคมชัดที่สุด (Sharp) หรือมีลักษณะกราฟชันมากที่สุดลักษณะคล้ายฟังก์ชันขั้นบันได (Step Function) และเมื่อพิจารณาแกน 1 จะเห็นได้ว่ากรณีสามแกนแบบอะเรย์ และชนิดสองแกน มีค่าพิกกำลังงานการสวิต (Switching Power) ใกล้เคียงกันคือประมาณ $P_{\max} \approx 4$ ที่พิกเดียวกันนี้ของแกนที่ 1 ของคัปเปิลอร์ทั้งสองชนิด จะเห็นว่าคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์จะมีค่าการส่งผ่านกำลังงานที่ต่ำกว่า (คือประมาณ 88% กับ 76%) ส่วนนี้แสดงว่ามีการสูญเสียค้ำอยู่ในแกนอื่นของคัปเปิลอร์ชนิดนี้ขณะเกิดการสวิตสัญญาณมากกว่ากรณีของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าพัลส์เบรคอัพ (Pulse Breakup) และยังพบอีกว่าปรากฏการณ์นี้มีแนวโน้มจะเพิ่มตามจำนวนแกนของคัปเปิลอร์ที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย[2] ส่วนในกรณีคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า นั้นสังเกตได้ว่าแกน 2 กับแกน 3 สัญญาณจะทับกันเป็นผลจากความสมมาตรของโครงสร้าง ถึงแม้จะไม่มีคมชัดของสัญญาณมากนักและยังใช้กำลังการสวิตที่ค่อนข้างมาก แต่ด้วยความยาวที่น้อยที่สุดในทั้ง 3 กรณี ทำให้คัปเปิลอร์ชนิดนี้ยังคงมีความน่าสนใจอยู่มาก โดยเฉพาะการสวิตแบบใช้เฟสเซนสิทีฟ (Phase-Sensitive Switching) [2]

4.1.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนที่มีการโคปด้วยสารเออร์เบียมกรณีแกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth)



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ ค่าพิกกำลังงานอินพุต ที่แกนที่ 1 โดยเปรียบเทียบกับของกรณีมีการโคป ($\Gamma = 0.15$) และไม่มีกรโคป ($\Gamma = 0$) ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25$, $\mu = s = 0$)



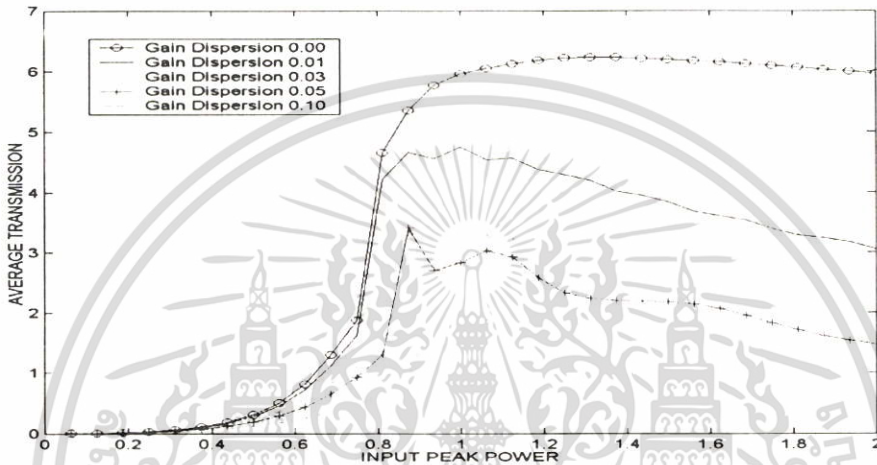
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงาน อินพุต ที่แกนที่ 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต เท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25$, $\mu = s = 0$)

จากรูป 4.3 และ 4.4 เป็นกรณีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth) คิดเฉพาะผลของ Γ จากผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลของ [3,5] เมื่อพิจารณารูป 4.3 ค่า $\Gamma = 0.15$ จะเห็นว่าสัญญาณออกของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยมีค่ามากถึง 600% นอกจากนี้ จากกราฟรูปที่ 4.4 ยังเห็นได้ว่ากรณีโคปด้วยเออร์เบียมนั้นจะมีความคมชัดของสัญญาณมากกว่า (sharper) ตอนไม่โคป ($\Gamma = 0$) มาก และอีกทั้งกำลังงานในการสวิต ลดลงจากประมาณ 1.33 จากตอนไม่โคปมาเป็นประมาณ 0.75 (กำลังงานการสวิตหาได้จากครึ่งหนึ่งของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์) การลดลงของกำลังงานการสวิตอาจทำความเข้าใจได้โดย พิจารณาค่าอนลิเนียร์เฟสชิฟ (Nonlinear Phase Shift) ของกรณีไม่โคปจะมีค่าเป็น $\phi^{NL} \cong |u_0|^2 L$ ในขณะที่กรณี คัปเปิลอร์ที่โคปจะมีค่าเป็น $\phi^{NL} \cong |u_0|^2 [\exp(2\Gamma L) - 1] / 2\Gamma$ ซึ่งในการสวิตทางแสงเกิดได้เมื่อเฟส $\phi^{NL} > 2\pi$ สำหรับ $\Gamma > 0$ จะเห็นว่าค่าอนลิเนียร์เฟสชิฟของกรณีกัปเปิลอร์ที่โคปจะมีค่ามากกว่าเสมอหรือถึงจุดของกำลังงานการสวิตได้ด้วยกำลังงานค่าต่ำกว่านั่นเอง [5] ลักษณะสัญญาณการสวิตของโซลิตอนในคัปเปิลอร์ใยแก้วที่โคปสารเออร์เบียม (erbium-doped fiber coupler) นั้นเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก เพราะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถขยายสัญญาณ สวิตสัญญาณ และยังบีบอัดสัญญาณได้ภายในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน[5]

จากรูป 4.4 จะเห็นว่าเมื่ออัตราขยาย (Γ) มากขึ้นสัญญาณจะมีลักษณะคมชัดขึ้น และใช้กำลังในการ สวิตน้อยลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่แกน (Γ) เท่ากับ 0.15 จะให้สัญญาณที่มีความคมชัดมากให้

คุณลักษณะการเป็นสวิตที่ดี ซึ่งการใช้กำลังงานที่ต่ำเป็นที่ต้องการสำหรับการสวิตเชิงกำลังงาน (Power Switching)

4.1.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลเลอร์ชนิดสองแกนที่มีการโคปด้วยสารเออร์เบียมกรณีแกนแบนด์วิดธ์จำกัด (Finite Gain Bandwidth)

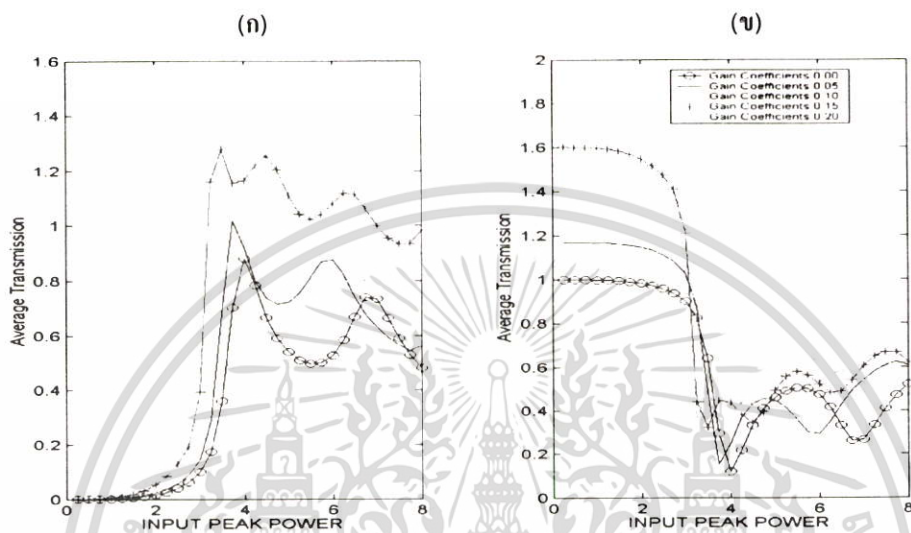


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พีดกำลังงานอินพุต ที่แกนที่ 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่าของ μ เมื่อ Γ มีค่าเท่ากับ 0.15 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = 2\pi$ ($K = 0.25, s = 0$)

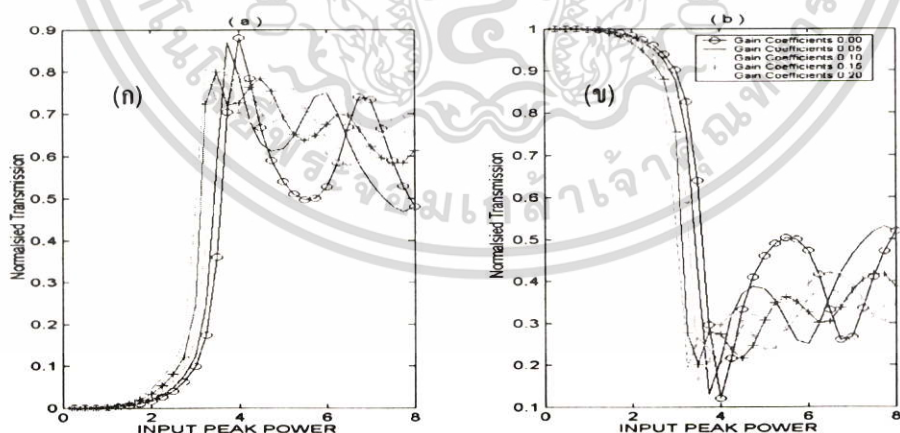
จากรูปที่ 4.5 เป็นกรณีแกนแบนด์วิดธ์ที่มีค่าจำกัด (Finite Gain Bandwidth) อันเนื่องจากการพิจารณาแบนด์วิดธ์ของพัลส์โซลิตอน (Bandwidth of the Pulse) หรือกรณีพัลส์วิคซ์แคบๆ และโดยเลือกใช้ Γ เท่ากับ 0.15 แล้วปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ เพิ่มสูงขึ้น ผลปรากฏว่าค่าการส่งผ่านสัญญาณมีลักษณะลดต่ำลงพร้อมทั้งกำลังงานการสวิตจะมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกำลังงานในการสวิตก็ยิ่งน้อยกว่าในกรณีไม่ได้โคป ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า μ มากขึ้นจะสอดคล้องกับความกว้างของพัลส์ (Pulse Width) ที่แคบลงหรือสเปกตรัมของพัลส์ที่กว้างขึ้น ทำให้องค์ประกอบของพัลส์ที่มีความถี่สูงได้รับเกนที่น้อยกว่าองค์ประกอบของพัลส์ที่ความถี่ต่ำที่อยู่ตรงกลางของพาราโบลาแบนด์ (Parabolic Gain Band) ทำให้พลังงานรวมของพัลส์ที่ได้จากตัวกลางที่มีอัตราขยายมีค่าลดลง สัญญาณออกที่ได้จึงลดลงนั่นเอง กล่าวโดยสรุปเมื่อพัลส์ยิ่งแคบสอดคล้องกับการกระจายของเกน (Gain Dispersion) ที่มากขึ้น อัตราขยายรวมที่ได้จะลดลงทำให้ต้องใช้กำลังงานในการสวิตที่สูงมากขึ้น

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอนในคัปเปิลอร์ที่มีการโคปด้วยเออร์เบียม กรณีเกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth)

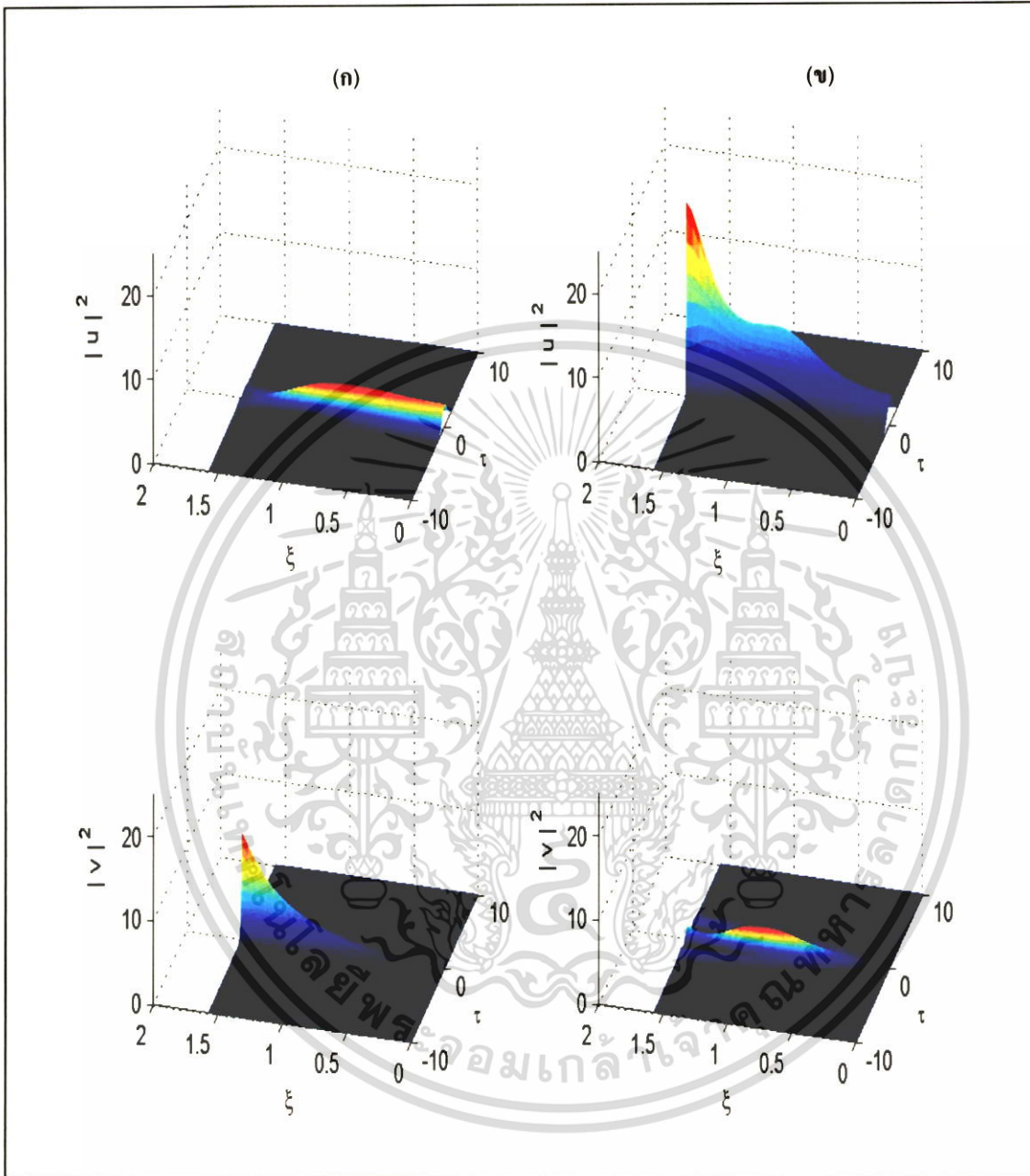
4.2.1 ผลการศึกษาเกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน



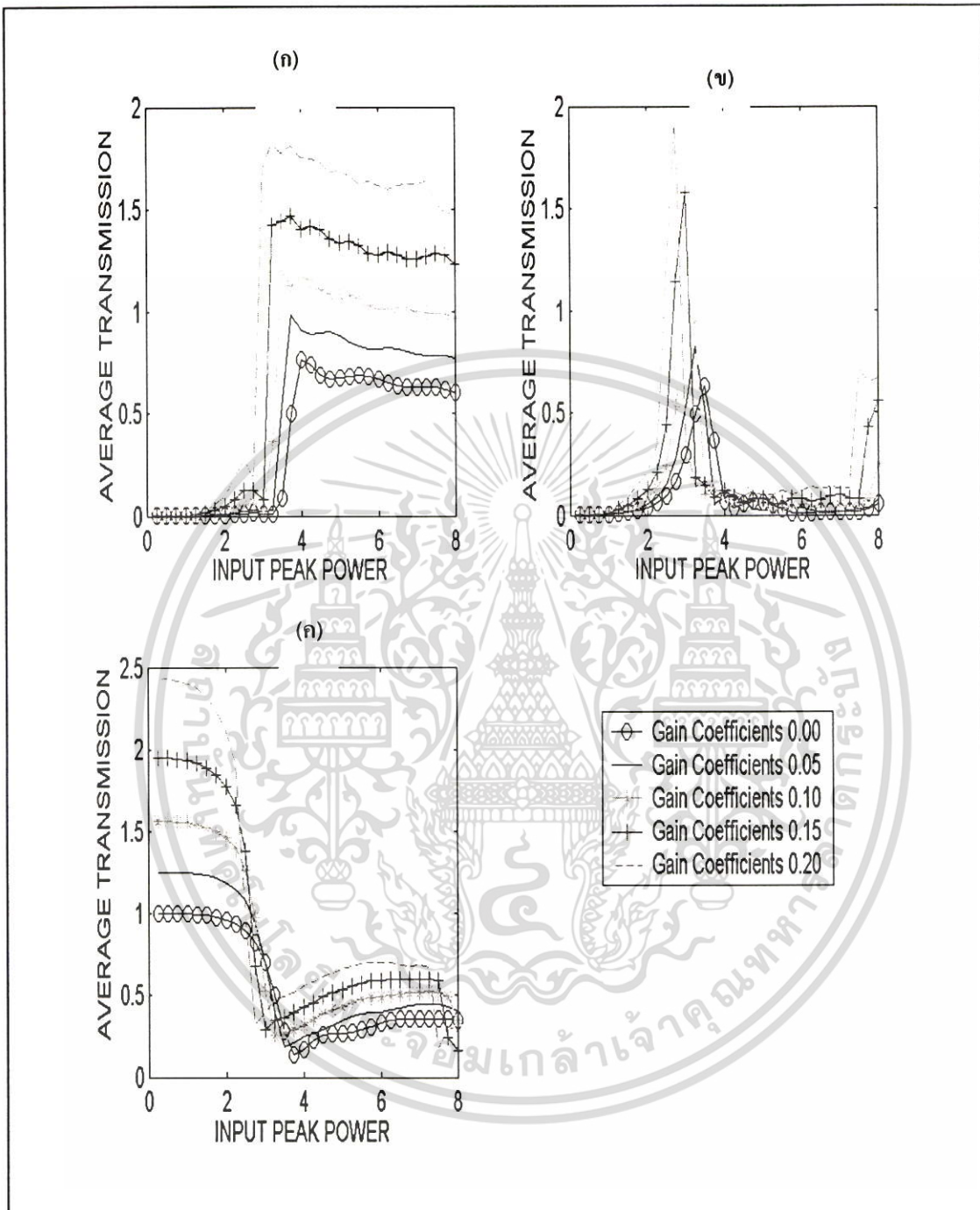
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ Γ (ก) เกน 1 (ข) เกน 2 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวปีต $L_c = \pi/2$ ($K = 1, \mu = s = 0$)



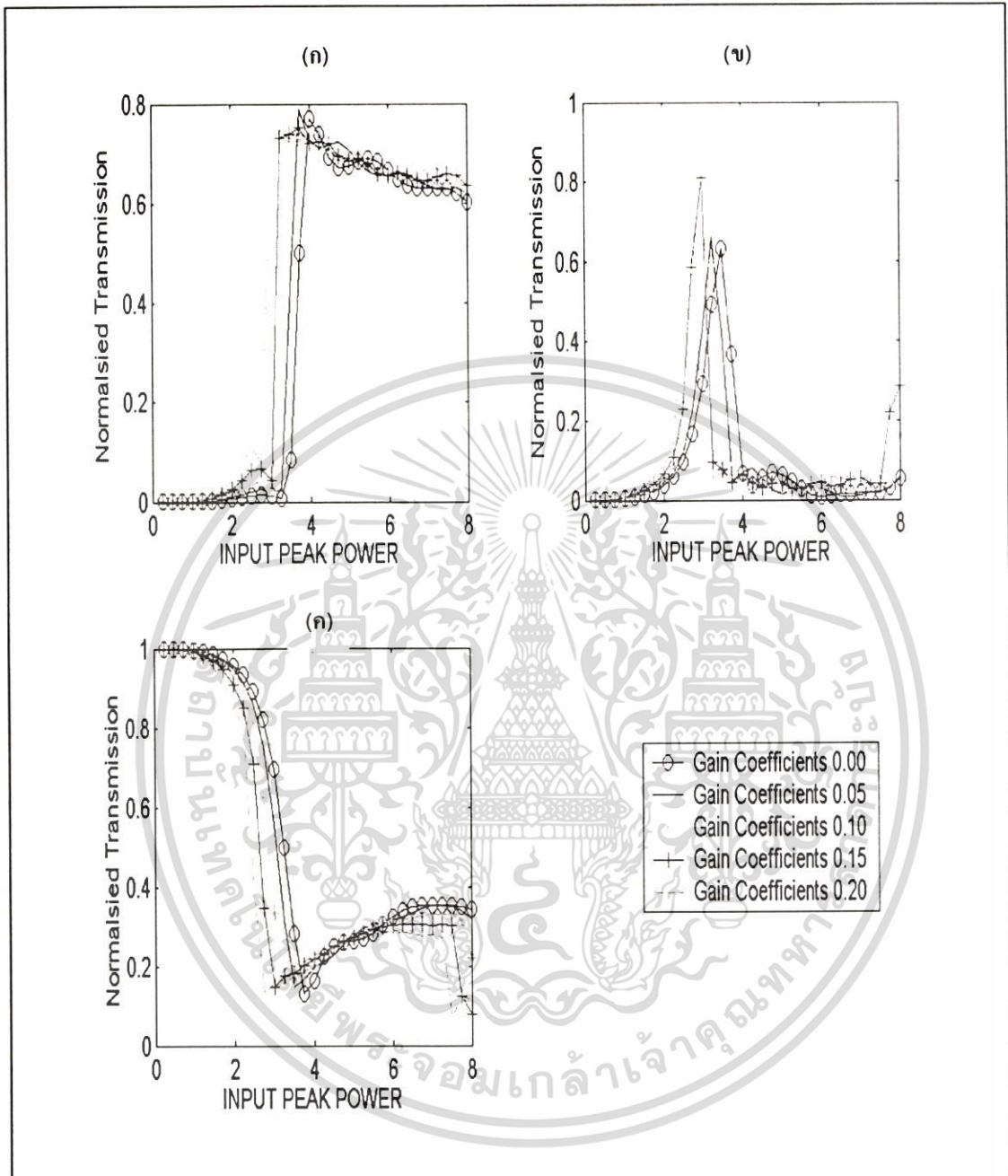
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ที่สัมพันธ์กับรูปที่ 4.6 เมื่อ (ก) เกน 1 (ข) เกน 2



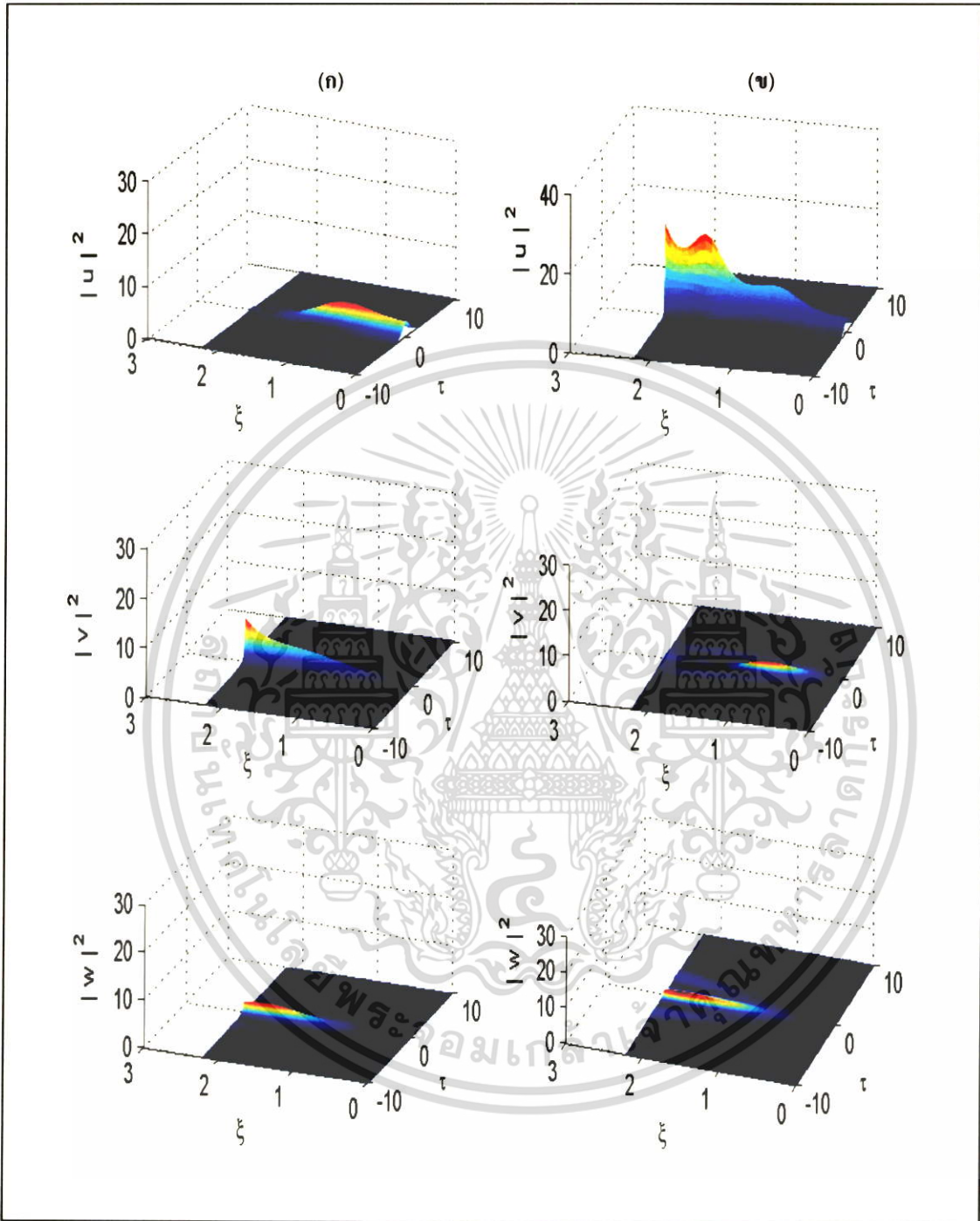
รูปที่ 4.8 แสดงรูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนสำหรับค่ากำลังงานอินพุตที่ต่ำและสูงกว่ากำลังการสวิตของโซลิตอนที่สอดคล้องกับรูป 4.7 โดยกำลังงานการสวิตมีค่าประมาณ 3.16 และ $\Gamma = 0.15$ (ก) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 2.5 (ข) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5



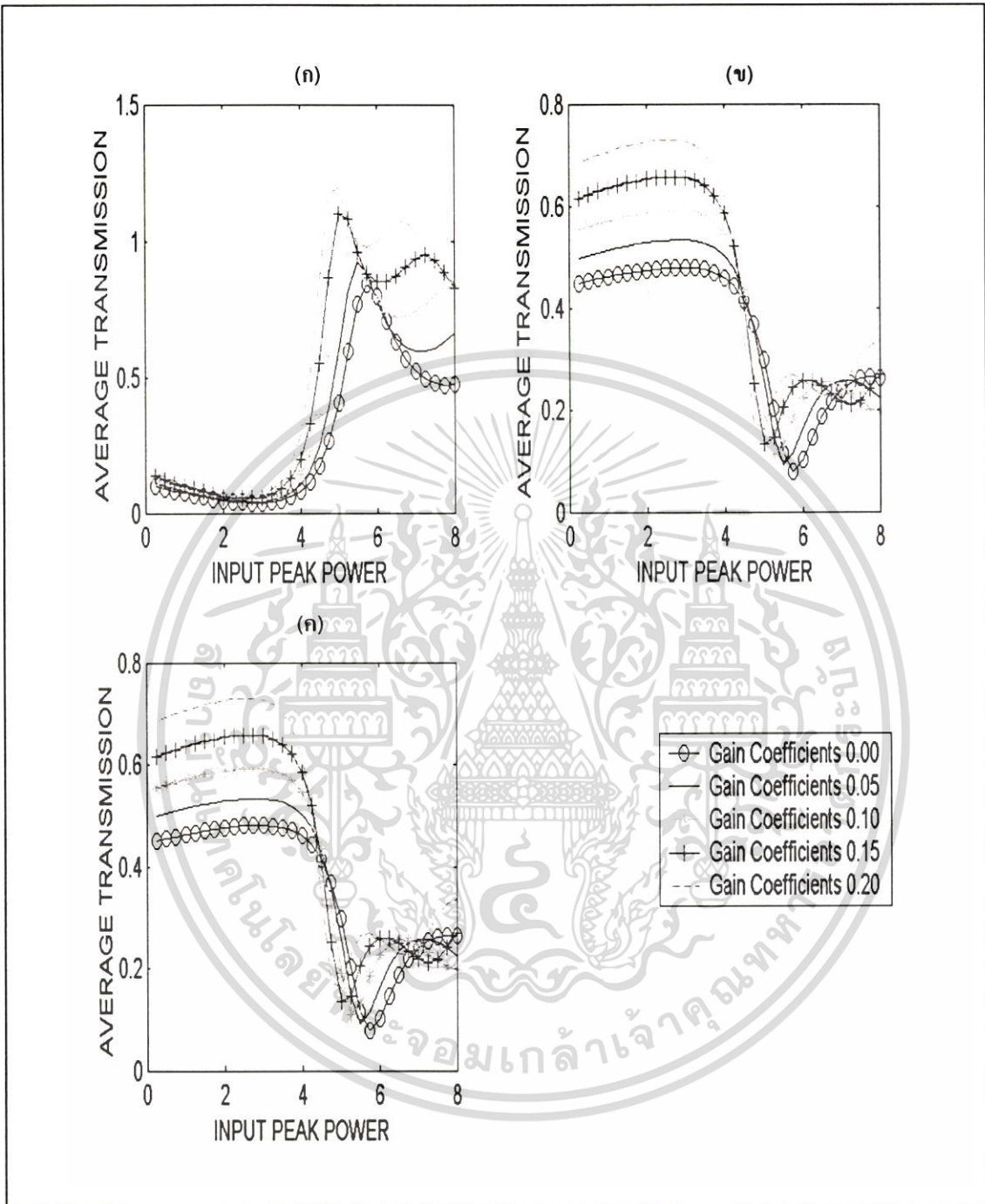
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของ
 ฟิลเตอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2
 (ค) แกน 3 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบีต $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K=1$, $\mu=s=0$)



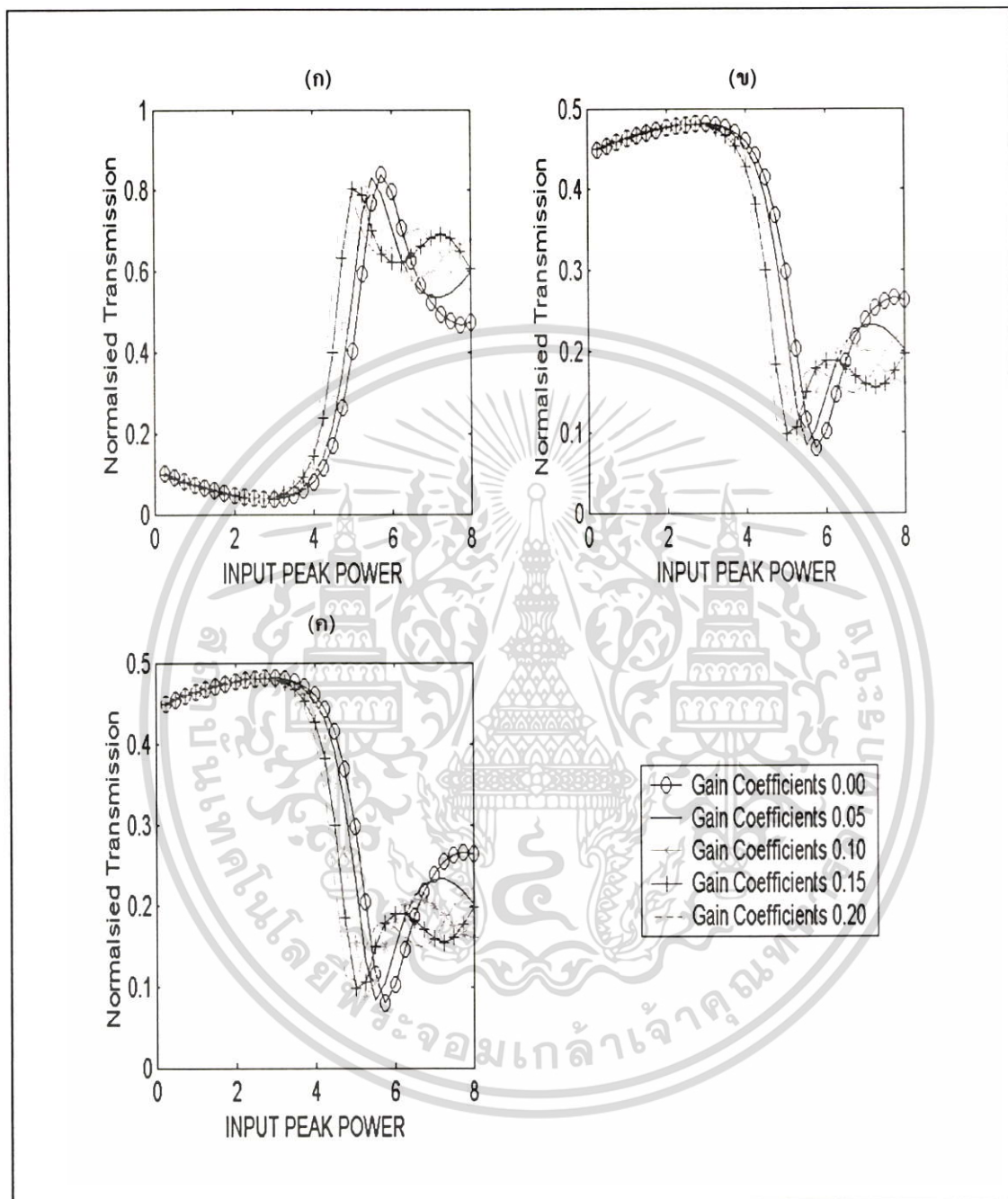
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลเลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1, \mu = s = 0$)



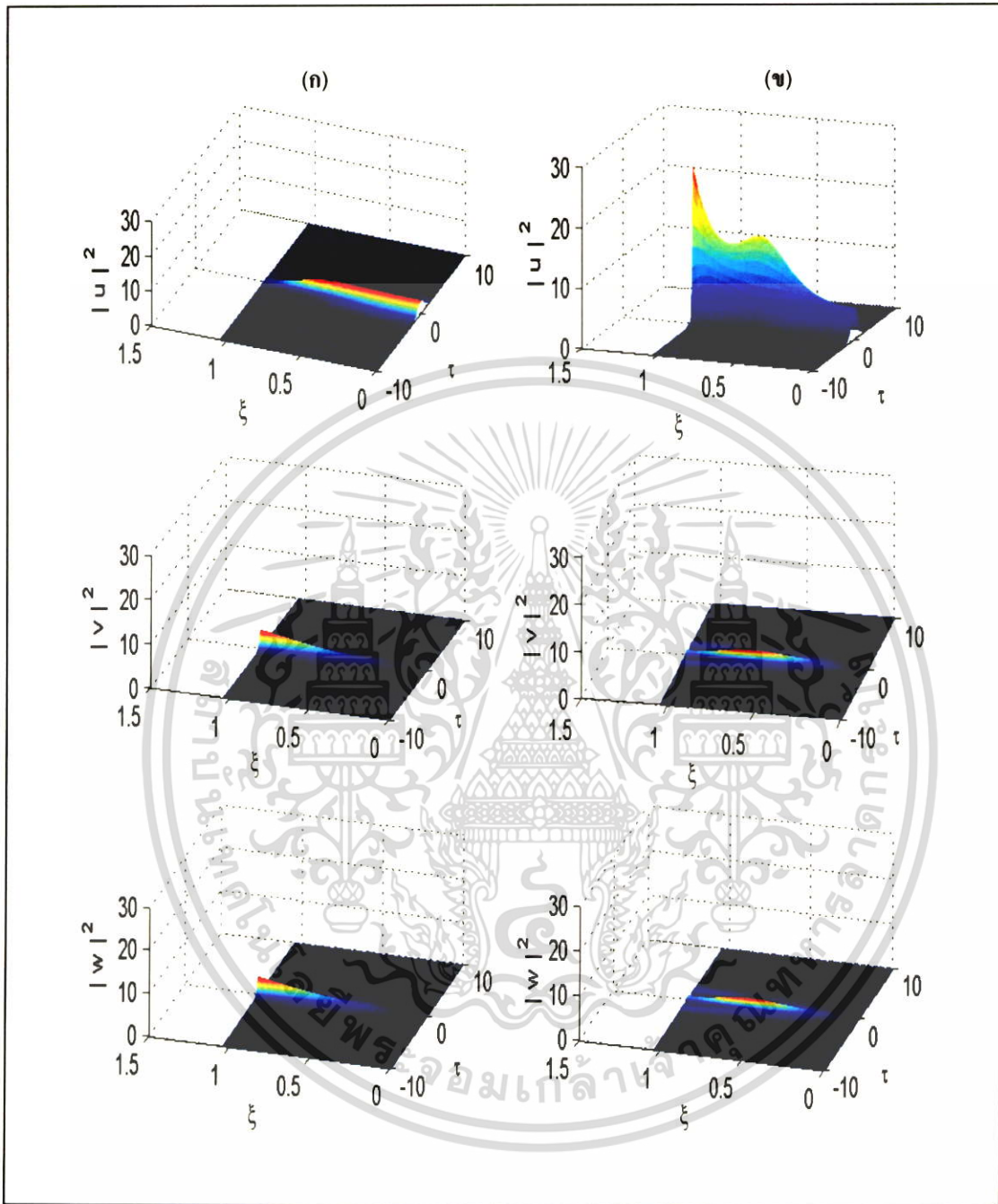
รูปที่ 4.11 แสดงรูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ สำหรับค่ากำลังงานอินพุตที่ต่ำและสูงกว่ากำลังการสวิตของโซลิตอนที่สอดคล้องกับรูป 4.10 โดยกำลังงานการสวิตมีค่าประมาณ 3.5 และ $\Gamma = 0.15$ (ก) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 2.8 (ข) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของ คัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/3$ ($K = 1, \mu = s = 0$)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงาน ินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยการปรับเปลี่นค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบีต $L_c = \pi/3$ ($K=1, \mu=s=0$)



รูปที่ 4.14 แสดงรูปสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า สำหรับค่ากำลังงานอินพุตที่ต่ำและสูงกว่ากำลังการสวิตของโซลิตอนที่สอดคล้องกับรูป 4.13 โดยกำลังงานการสวิตมีค่าประมาณ 4.62 และ $\Gamma = 0.15$ (ก) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ข) กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2

จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.14 เป็นกรณีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth) เป็นพิจารณาผลของอัตราขยาย Γ โดยพิจารณาค่า Γ เป็นค่าคงที่ จากรูปที่ 4.6 4.7 4.9 4.10 4.12 และรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาที่แกน 1 และ 2 ของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน และพิจารณาแกน 1 และแกน 3 ของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกน (แกน 1 เปลี่ยนสถานะต่ำไปสูง ส่วนแกน 2 ของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนหรือ แกน 3 ของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนเปลี่ยนสถานะจากสูงไปต่ำ) กรณีโคปนั้นจะมีความคมชัดของสัญญาณมากกว่า (Sharper) ตอนไม่โคป ($\Gamma = 0$) มาก เมื่อ Γ มากขึ้นสัญญาณจะมีลักษณะคมชัดขึ้น และใช้กำลังในการสวิตน้อยลง โดยเฉพาะที่อัตราขยาย (Γ) เท่ากับ 0.15 จะให้สัญญาณที่มีความคมชัด (sharp) มากให้คุณลักษณะการเป็นสวิตที่ดี ซึ่งการใช้กำลังงานที่ต่ำเป็นที่ต้องการสำหรับการสวิตเชิงกำลังงาน (Power Switching) การลดลงของกำลังงานการสวิตทำความเข้าใจได้ดังนี้ ในกรณีไม่โคปจะมีอนลิเนียร์เฟสชิฟ (Nonlinear Phase Shift) มีค่าเป็น $\phi^{NL} \cong |u_0|^2 L$ ในขณะที่กรณีคัปเปิลอร์ที่โคปจะมีค่าเป็น $\phi^{NL} \cong |u_0|^2 [\exp(2\Gamma L) - 1] / 2\Gamma$ ซึ่งในการสวิตทางแสงเกิดได้เมื่อเฟส $\phi^{NL} > 2\pi$ สำหรับ $\Gamma > 0$ จะเห็นได้ว่าค่าอนลิเนียร์เฟสชิฟของกรณีคัปเปิลอร์ที่โคปจะมีค่ามากกว่าหรือถึงจุดที่มีการสวิตได้ด้วยกำลังงานค่าต่ำกว่านั่นเอง [5] พิจารณารูป 4.7 สำหรับคัปเปิลอร์ ชนิดสองแกนที่ความยาวคัปเปิลอร์ $L_c = \pi/2$ พิจารณาแกนที่ 1 ค่ากำลังงานการสวิต (Switching Power) ของพัลส์โซลิตอน มีค่า 3.60 3.44 3.30 3.16 และ 3.03 เมื่อพิจารณารูป 4.10 สำหรับคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรียที่ความยาวคัปเปิลอร์ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ พิจารณาแกนที่ 1 ค่ากำลังงานการสวิต (Switching Power) มีค่าเป็น 3.75 3.56 3.33 3.15 และ 2.96 และ เมื่อพิจารณารูป 4.13 สำหรับคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ความยาวคัปเปิลอร์ $L_c = \pi/3$ เมื่อพิจารณาแกนที่ 1 ค่ากำลังงานการสวิต (Switching Power) มีค่าเป็น 5.14 4.96 4.78 4.62 และ 4.44 โดยกำลังงานสวิตของคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิดสอดคล้องกับ Γ ที่มีค่าเป็น 0.00 0.05 0.10 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ

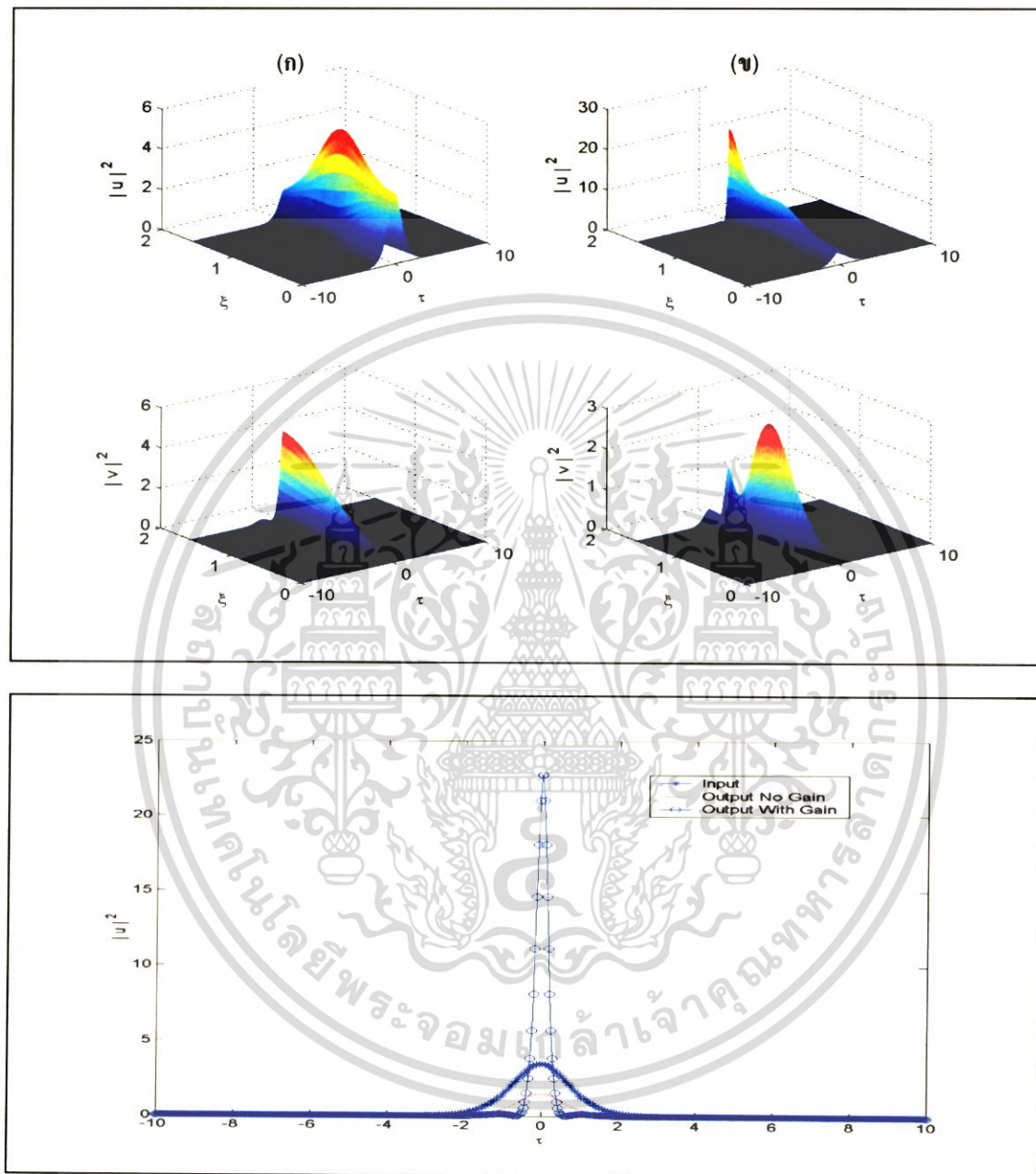
จากรูปที่ 4.6 4.9 และ 4.12 เป็นการพิจารณาอัตราขยายกับค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย หากพิจารณาที่แกน 1 พบว่าเมื่อแกนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการส่งผ่านของสัญญาณเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น กรณีคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนค่าพิคของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยมีค่ามากถึง 85% 100% 110% 130% และ 150% สำหรับ Γ ที่มีค่าเป็น 0.00 0.05 0.10 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ

หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสวิตของคัปเปิลอร์ทั้งสามแบบ จะพบว่าคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรียจะใช้ค่ากำลังงานในการสวิตต่ำที่สุดและความคมชัดของสัญญาณการสวิตดีที่สุดเมื่อพิจารณาที่ Γ เดียวกัน โดยเฉพาะเมื่อ Γ ที่มากกว่า 0.15 ส่วนคัปเปิลอร์แบบสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าจะใช้กำลังงานการสวิตที่สูงที่สุดและค่าความคมชัดของสัญญาณการสวิตแย่ที่สุด จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ของกรณี คัปเปิลอร์ชนิดสองแกนพิจารณาที่แกน 1 เมื่อ กำลังงานสูงๆจะมีการแกว่งขึ้นลงของ

สัญญาณมากขึ้นตามแนวโน้มของเกณฑ์มากขึ้น แต่ค่าการแกว่งขึ้นลงของสัญญาณอยู่ในช่วงที่แคบเมื่อเทียบกับกรณีอัตราขยายที่ต่ำกว่า พิจารณารูปที่ 4.9 และ 4.10 สำหรับกรณี คัปเพลอร์สามแกนแบบอะเรย์มีลักษณะการสวิตที่คือความคมชัดที่สูงแทบจะไม่มีการแกว่งของค่าการส่งผ่านสัญญาณที่กำลังงานสูงๆ สำหรับทุกค่าของอัตราขยายที่ใช้ ส่วนกรณี คัปเพลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 มีแนวโน้มคล้ายกับกรณี คัปเพลอร์ชนิดสองแกน หากเปรียบเทียบคัปเพลอร์ทั้งสามชนิดจากรูปที่ 4.6 4.9 และ 4.12 สำหรับคัปเพลอร์ทั้งสามชนิด เมื่ออัตราขยายมากขึ้นค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยจะมากขึ้นตาม และแนวโน้มค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยสำหรับแต่ละค่าอัตราขยายจะมากที่สุดสำหรับ คัปเพลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ และจะมีน้อยสุดสำหรับคัปเพลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า เช่น $\Gamma = 0.15$ สัญญาณออกของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยมีค่าพิกสูงมากถึง 120% 150% และ 110% สำหรับ คัปเพลอร์ชนิดสองแกน สามแกนอะเรย์ และสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างและความยาวคัปเพลอร์ที่ยาวไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาผลของความยาวคัปเพลอร์ซึ่งคัปเพลอร์ที่ยาวกว่าย่อมรับได้อพติคองเกน (Optical Gain) ที่มากกว่า เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพที่ร้อยละเช่นเดียวกัน พิจารณาได้จากค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ พิจารณารูปที่ 4.7 4.10 และ 4.13 เช่น กรณี $\Gamma = 0.15$ ความสามารถในการสวิตของคัปเพลอร์ทั้งสามชนิดที่ค่าพิกของค่าการส่งผ่านสัญญาณที่เกณฑ์ 1 ค่าที่ได้ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 80 % แต่คัปเพลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์จะมีลักษณะความคมชัดและไม่มีแกว่งของสัญญาณที่กำลังงานสูงๆ อีกทั้งสัญญาณรบกวนข้ามช่อง (Crosstalk) ของเกณฑ์ 3 มีค่าต่ำ โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10-25 % ณ สภาวะเปิด (On State)

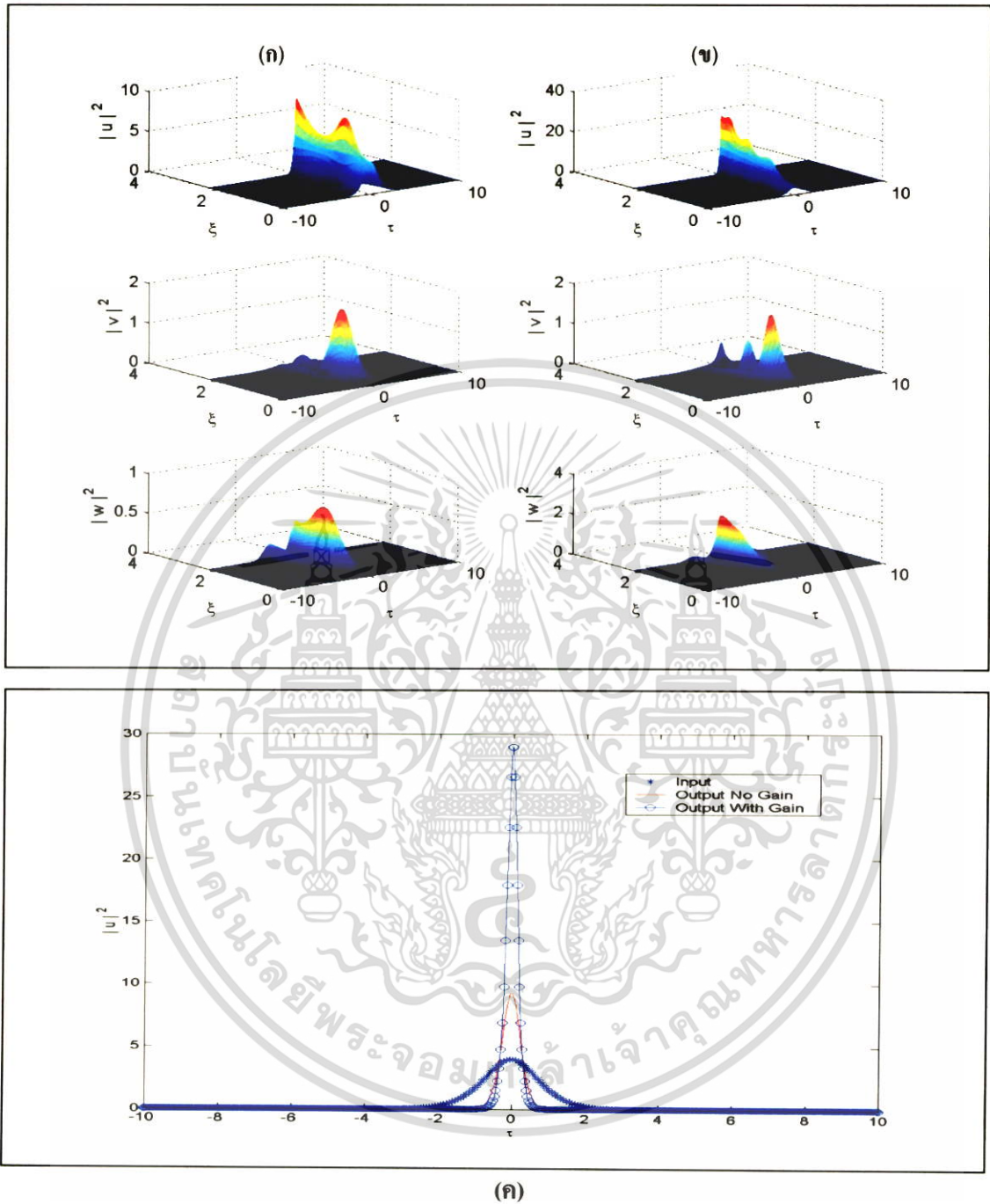
จากรูปที่ 4.8 4.11 และ 4.14 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของสัญญาณพัลส์โซลิตอนที่เคลื่อนตัวในคัปเพลอร์ จะเห็นว่า พัลส์โซลิตอนจะกระจายอยู่ตามแกนต่างๆ เมื่อกำลังงานยังไม่ถึงกำลังงานในการสวิต (Switching Power) โดยเฉพาะจะมีค่าความเข้มที่น้อยมากในแกน 1 แต่เมื่อกำลังงานเลขค่ากำลังงานในการสวิตแล้ว พัลส์โซลิตอนส่วนใหญ่จะย้ายไปอยู่ในแกน 1 สัญญาณขาออกที่ได้มีทั้งการสวิตและการขยายสัญญาณ ในส่วนการสวิตสัญญาณนั้น รูปสัญญาณขาออกมีลักษณะเกือบสมบูรณ์แบบ มีสัญญาณบางส่วนหลงเหลือในแกนอื่นเล็กน้อย โดยสัญญาณพวกนี้จะมีการขยายด้วยแต่จะไม่มีการสวิต นอกจากการขยายสัญญาณด้วยแล้วพัลส์ยังมีการบีบอัดตัวอีกด้วยเนื่องจากว่าความกว้างของพัลส์ของโซลิตอนจะแปรผกผันกับค่าพิกกำลังงานของมัน ดังนั้นโซลิตอนจะพยายามปรับความกว้างพัลส์ในขณะที่มันถูกขยายสัญญาณเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการเคลื่อนตัวของโซลิตอน [3,5]

4.2.2 ผลการศึกษาแกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัดที่ส่งผลต่อรูปสัญญาณโวลิตอนในคัปเปิลอร์

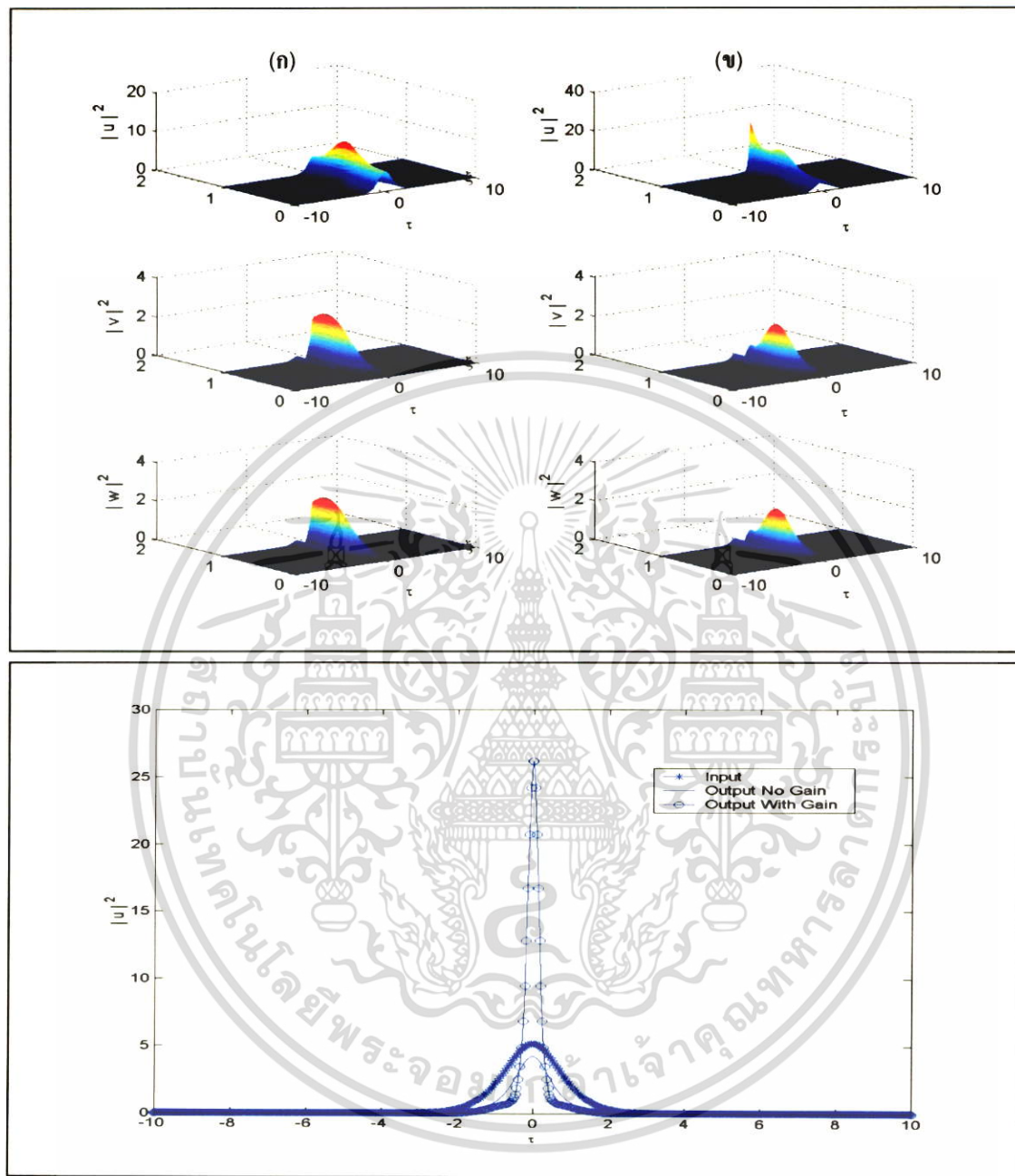


(ค)

รูปที่ 4.15 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โวลิตอนที่มีการเคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนอันเนื่องมาจากผลของแกนแบนด์วิดท์ไม่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ก) $\Gamma = 0$ (ข) $\Gamma = 0.15$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โวลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิดเท่ากับ $L_c = \pi/2$ ($K = 1, \mu = s = 0$)



รูปที่ 4.16 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนที่มีการเคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ เนื่องจากผลของแกนเบนดักซ์ไม่จำกัดใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 4 (ก) $\Gamma = 0$ (ข) $\Gamma = 0.15$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K=1, \mu = s = 0$)



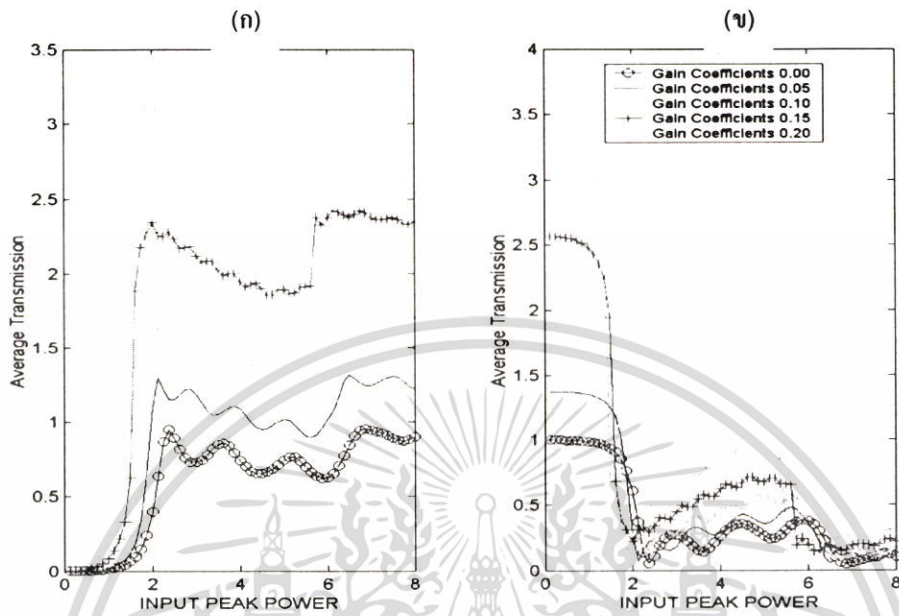
(ค)

รูปที่ 4.17 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิทอนที่มีการเคลื่อนตัวในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าอันเนื่องจากผลของแกนเบนดิวิตซ์ไม่จำกัดใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2 (ก) $\Gamma = 0$ (ข) $\Gamma = 0.15$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิทอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวปิดเท่ากับ $L_c = \pi/3$ ($K = 1$, $\mu = s = 0$)

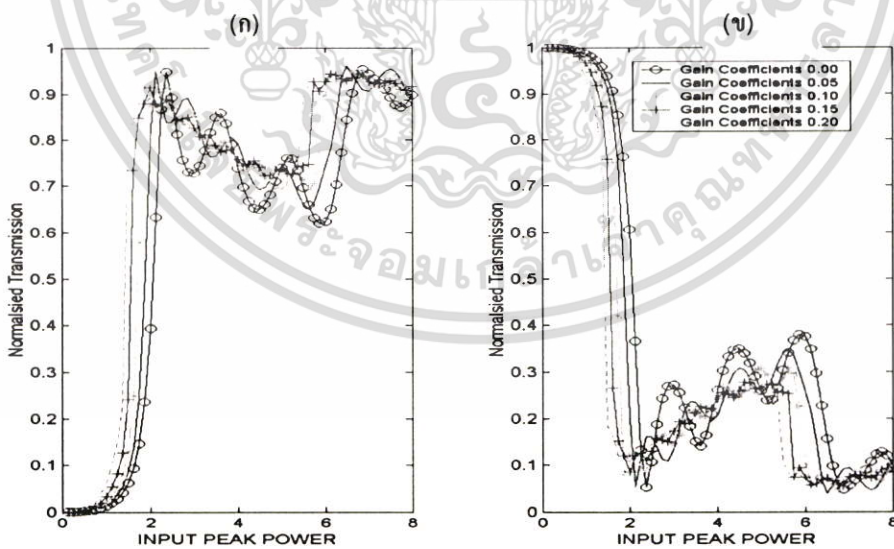
รูปที่ 4.15 ถึง 4.17 เป็นการเปรียบเทียบผลของแกนแบนด์วิดซ์ไม่จำกัดหรือผลของอัตราขยายที่มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ โดยพิจารณาเลือกค่ากำลังงานอินพุตให้มากกว่ากำลังในการสวิตของโซลิตอนในแต่ละชนิดของคัปเปอเรอร์ หากพิจารณาที่แกนที่ 1 ของคัปเปอเรอร์ทั้งสามชนิด จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายมีผลต่อลักษณะสัญญาณที่ได้ โดยนอกจากการสวิตสัญญาณแล้ว ยังมีการขยายและบีบอัดสัญญาณ (Compression) ด้วย สังเกตได้จากค่าพัลส์สัญญาณขาออกมีพีคกำลังงานที่มากขึ้น อีกทั้งความกว้างพัลส์ที่แคบลง ทั้งนี้เนื่องมาจากโซลิตอนจะพยายามปรับความกว้างพัลส์ในขณะที่มันถูกขยายสัญญาณเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการเคลื่อนตัวของโซลิตอน นั่นคืออัตราขยายจะส่งผลต่อความกว้างพัลส์ขาออกโดยขึ้นกับค่ากำลังงานอินพุตที่ใช้



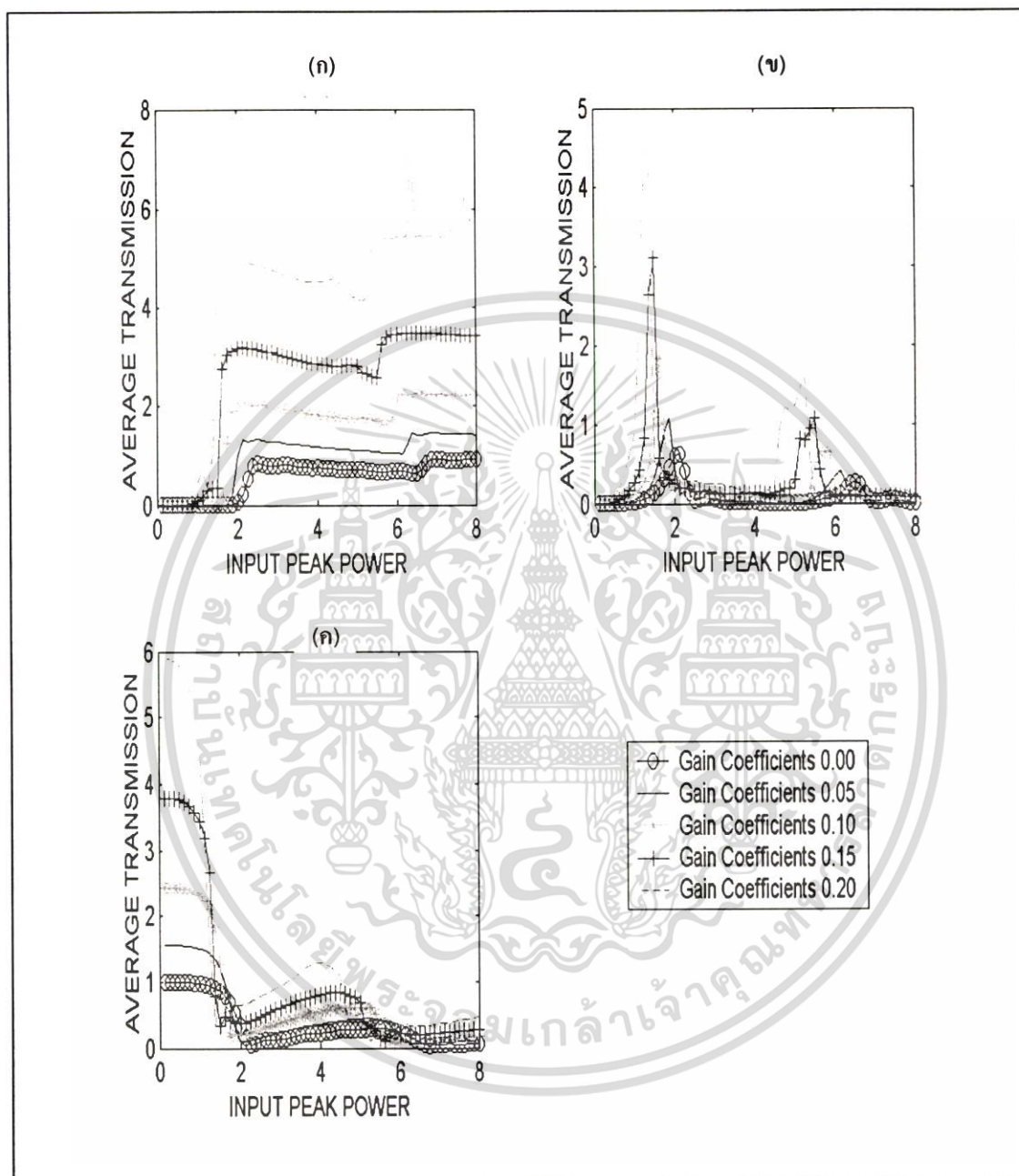
4.3 ผลการศึกษาการปรับเปลี่ยนความยาวของคัปเปลอร์ที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบิต



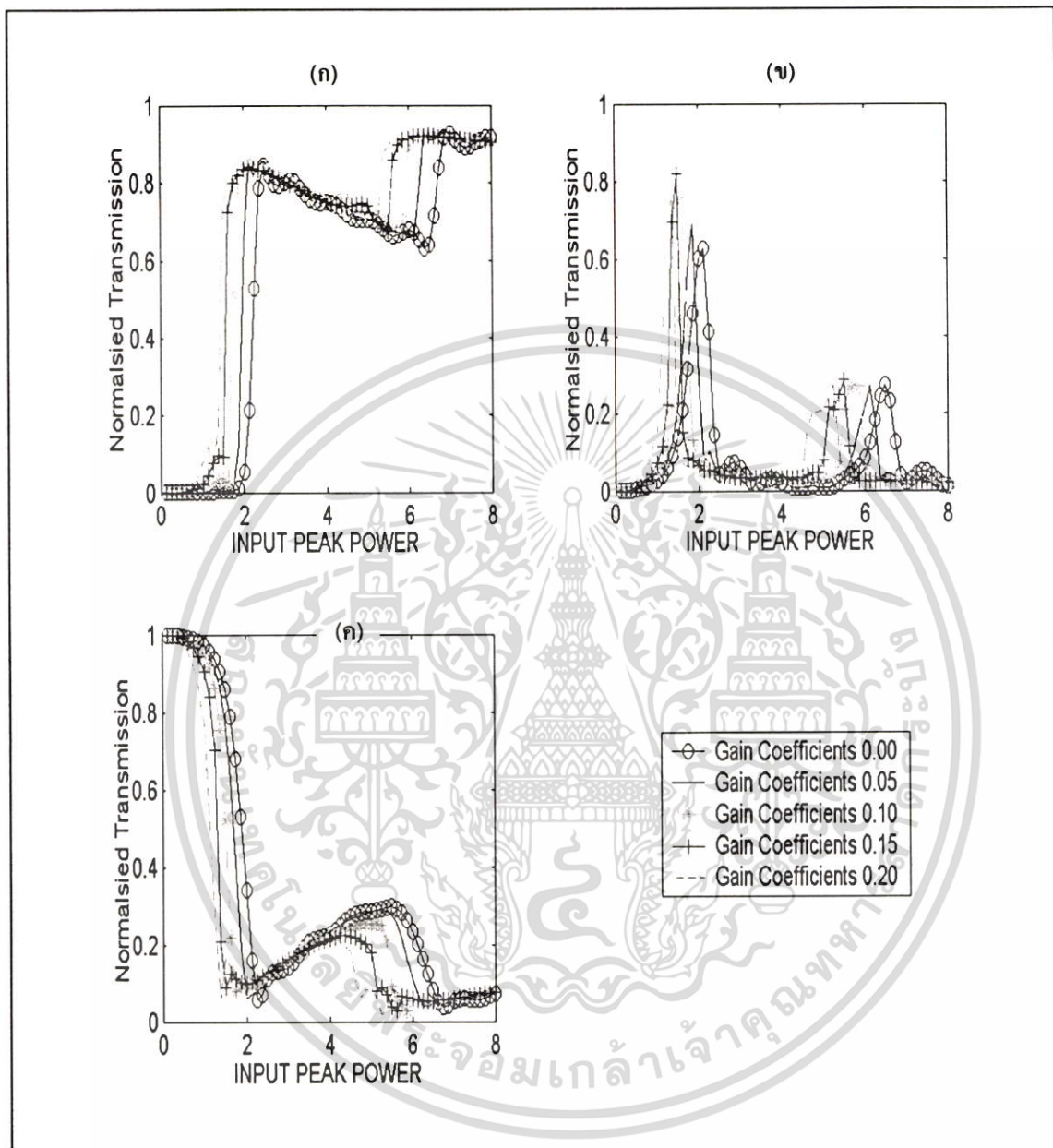
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปลอร์ชนิดสองแกน โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi$ ($K = 0.5$, $\mu = s = 0$)



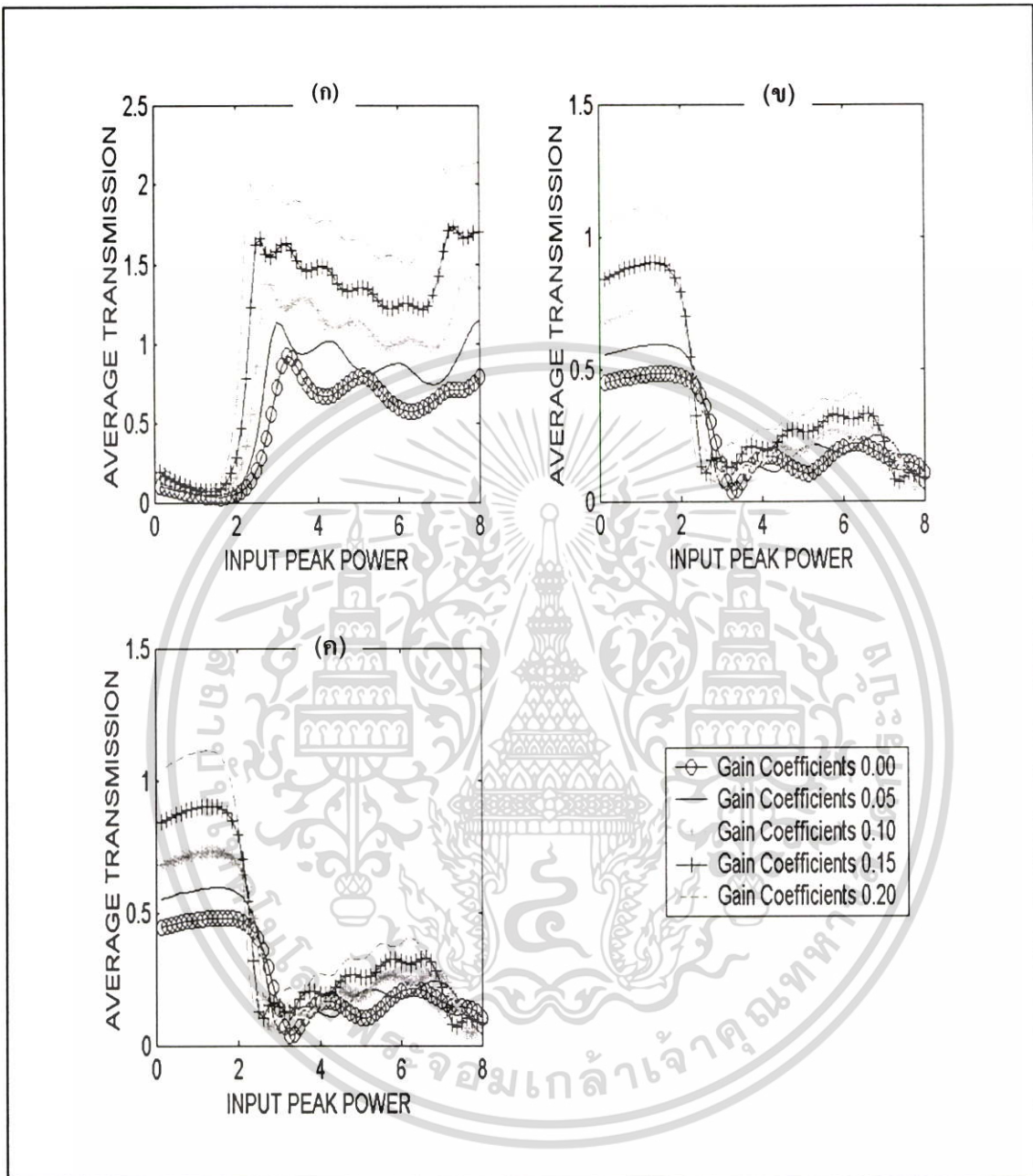
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ที่สัมพันธ์กับรูปที่ 4.18 (ก) แกน 1 (ข) แกน 2



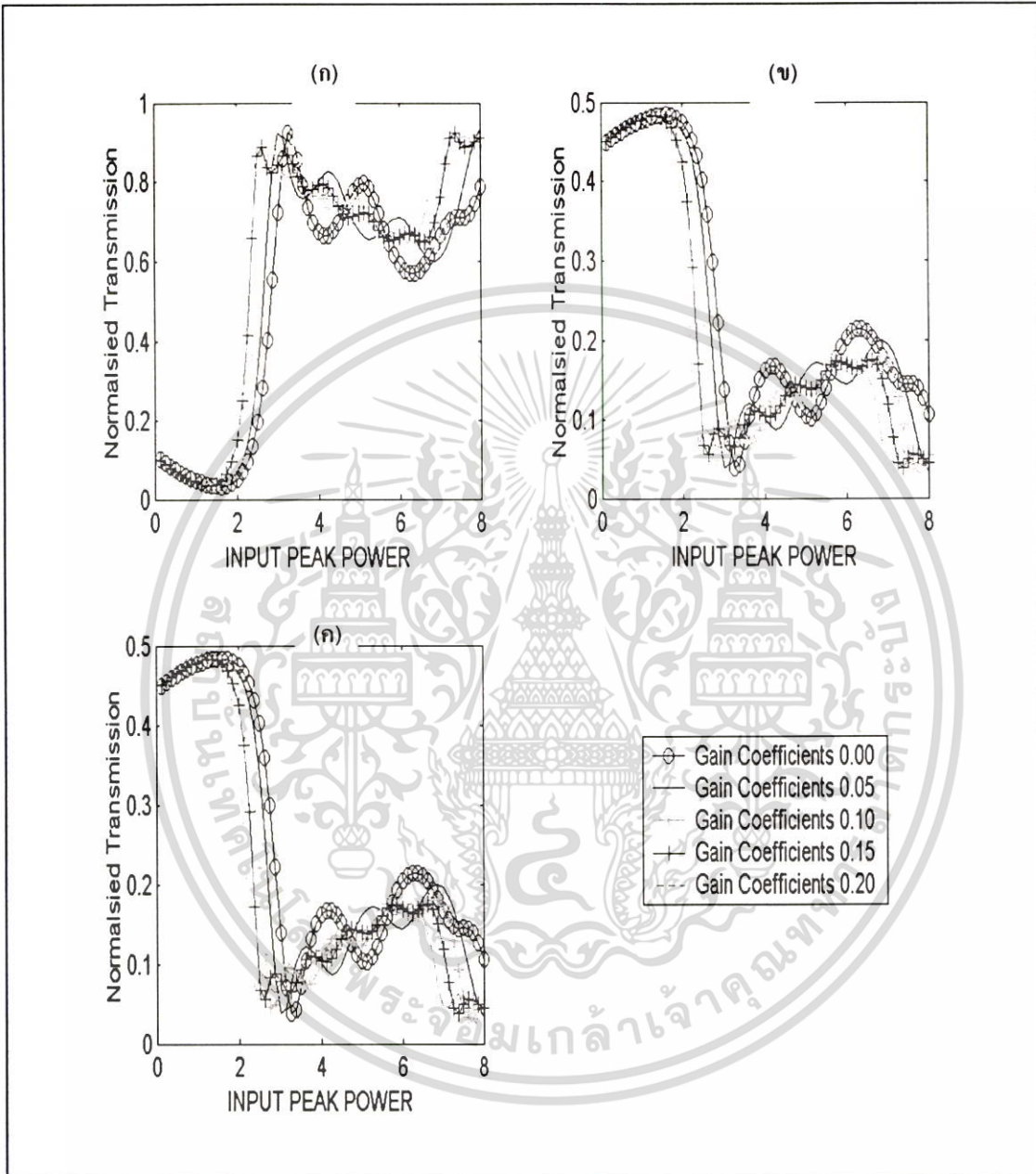
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของ คัปเปลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยค่า Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวปิด $L_c = 2\pi/\sqrt{2}$ ($K = 0.5$, $\mu = s = 0$)



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์กับ พิกกำลังงาน อินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่า Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบีต $L_c = 2\pi/\sqrt{2}$ ($\kappa = 0.5$, $\mu = s = 0$)



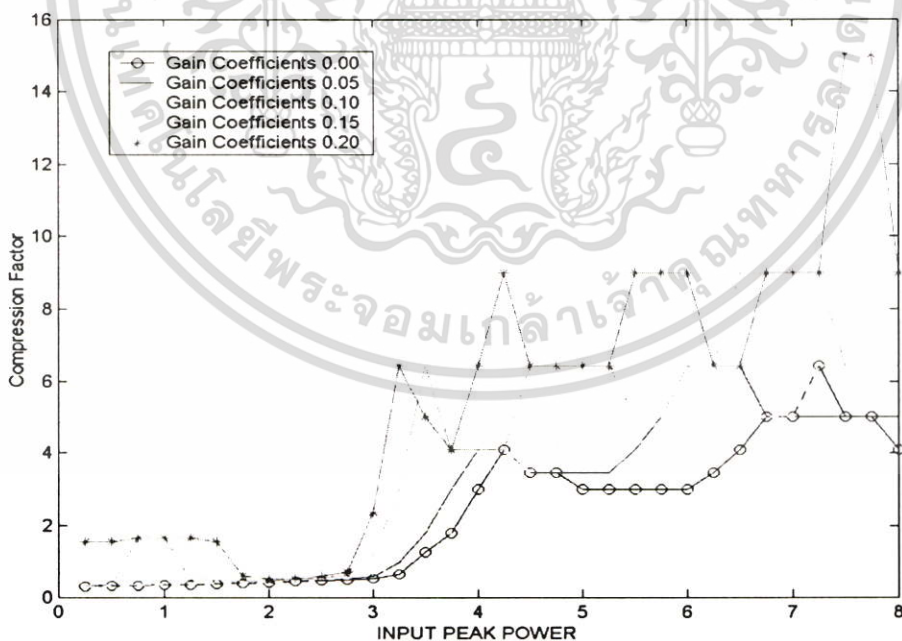
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของ
 คัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยค่าพารามิเตอร์ของ Γ
 (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = 2\pi / 3$
 ($K = 0.5, \mu = s = 0$)



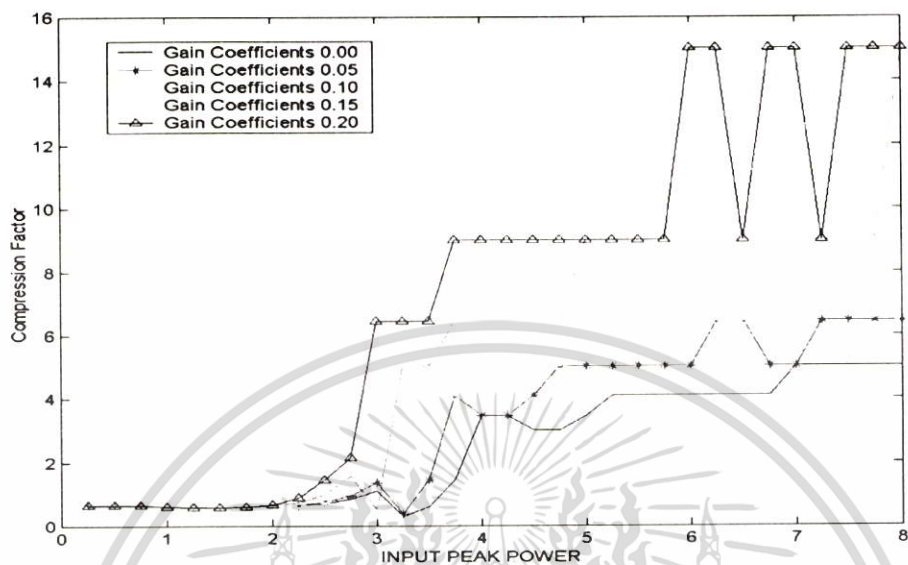
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าส่งผ่านสัญญาณที่ถูกทำการออร์มอลไลซ์ กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยค่าพารามิเตอร์ Γ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = 2\pi/3$ ($K = 0.5$, $\mu = s = 0$)

จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.23 เป็นกรณีแบนด์วิดธ์ของอัตราขยายที่มีค่าไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth) เหมือนหัวข้อ 4.2.2 โดยพิจารณาที่ระยะครึ่งของความยาวบิต แต่พิจารณาค่า κ ที่น้อยลง เลือกใช้ $\kappa=0.5$ หรือพิจารณาความยาวบิตที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบิตที่ยาวมากขึ้น จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.23 จะเห็นว่าแนวโน้มของอัตราขยายที่มีผลต่อการสวิตช์สัญญาณ มีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณี $\kappa=1$ ในหัวข้อ 4.2.2 นั่นคือ อัตราขยายที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังงานที่ใช้ในการสวิตช์สัญญาณลดลง และความชันกราฟที่มากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่ Γ ค่าเดียวกันจะเห็นได้ชัดว่ากำลังงานการสวิตช์ของคัปเปลอร์ที่ยาวกว่าจะใช้กำลังงานการสวิตช์สัญญาณที่น้อยกว่ามาก และนอกจากนั้นหากพิจารณาการเพิ่มของอัตราขยายจะส่งผลต่อการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า ณ ค่า Γ เดียวกัน สัญญาณออกมีค่ามากกว่าตอน กรณี $\kappa=1$ ในหัวข้อ 4.2.2 เป็นเพราะคัปเปลอร์ที่ยาวมากขึ้นได้รับออปติคอลเกนที่มากกว่าเดิมนั่นเอง โดยปรกคัปเปลอร์ที่ยาวกว่าจะให้คุณสมบัติการสวิตช์ที่ดีกว่า แต่ในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้คัปเปลอร์ที่ยาวมากนัก เพราะถูกสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ง่าย รวมไปถึงติดตั้งที่ยุ่งยากกว่า[10] ในงานวิจัยนี้เราจึงสนใจกรณี $\kappa=1$ เป็นสำคัญ

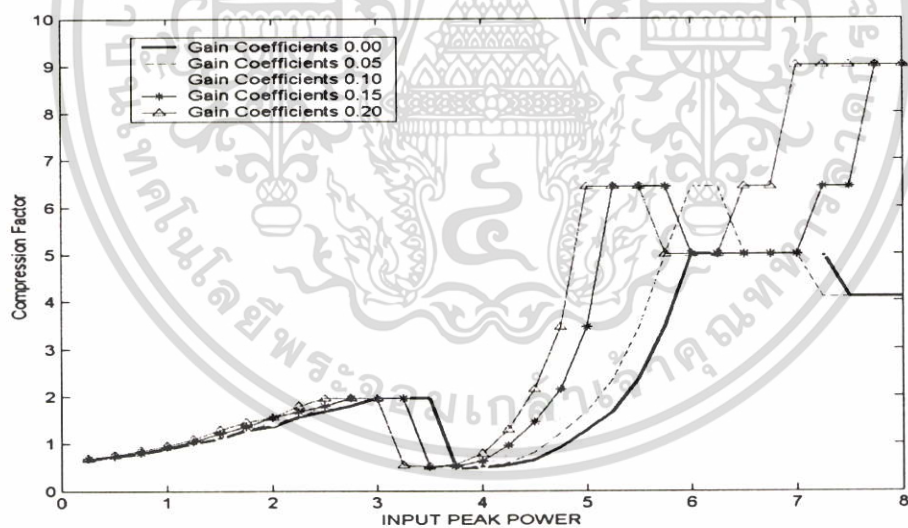
4.4 ผลการศึกษาสัดส่วนการบีบอัดตัวของสัญญาณเนื่องจากเกนแบนด์วิดธ์มีค่าไม่จำกัด



(ก)



(ข)



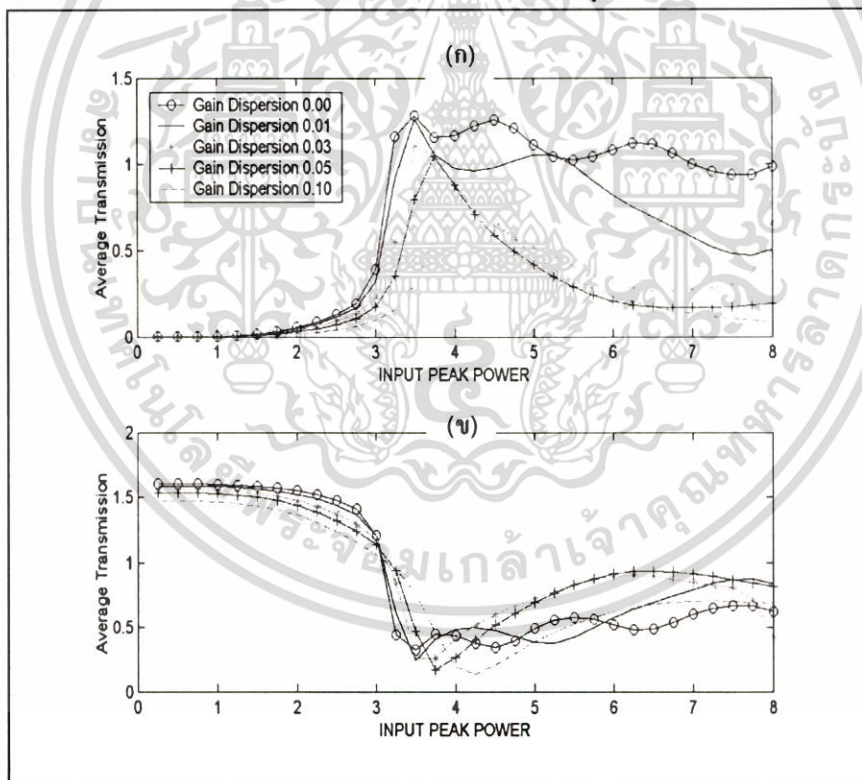
(ค)

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณ กับ พีดกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิดที่แกน 1 โดยการปรับเปลี่ยนค่า Γ (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกนอะเรย์ (ค) ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต ($K = 1, \mu = s = 0$)

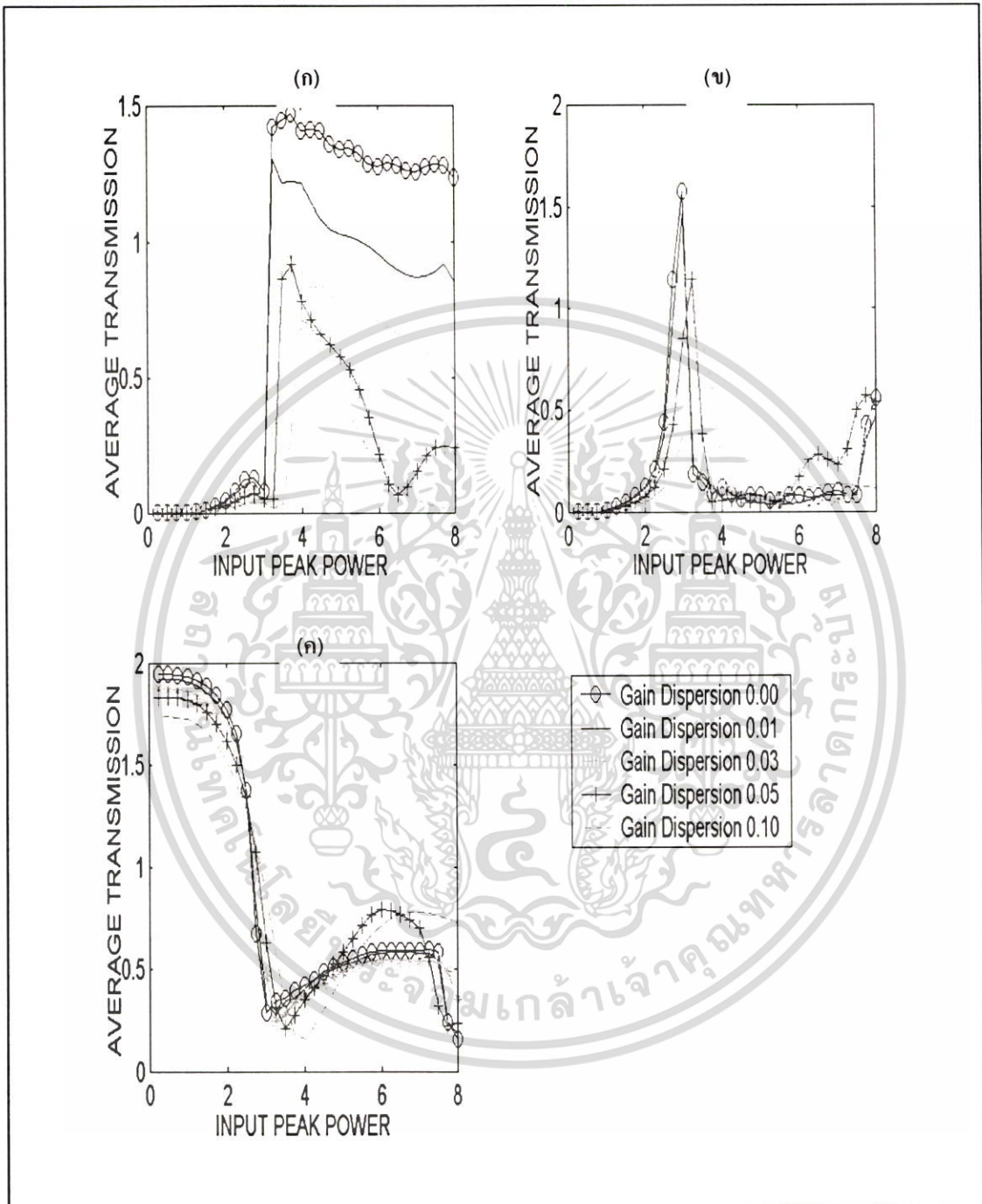
จากรูปที่ 4.24 พบว่าสำหรับคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิดเมื่อเพิ่มอัตราขยายมากขึ้นสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือสัมพันธ์กับความกว้างพัลส์สัญญาณ (Pulse Width) ขาออกที่แคบลง ทั้งนี้เนื่องมาจากโซลิตอนจะพยายามปรับความกว้างพัลส์ในขณะที่มันถูกขยายสัญญาณเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการเคลื่อนตัวของโซลิตอน นั่นคืออัตราขยายจะส่งผลต่อความกว้างพัลส์ขาออก โดยขึ้นกับค่ากำลังงานอินพุตที่ใช้ และ คัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีอัตราส่วนการบีบอัดที่ต่ำเมื่อเทียบกับคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนและคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ซึ่งมีสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณมากที่สุดถึง 15 เท่า

4.5 ผลการศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน ในคัปเปิลอร์ที่มีการโคปกรณีแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth)

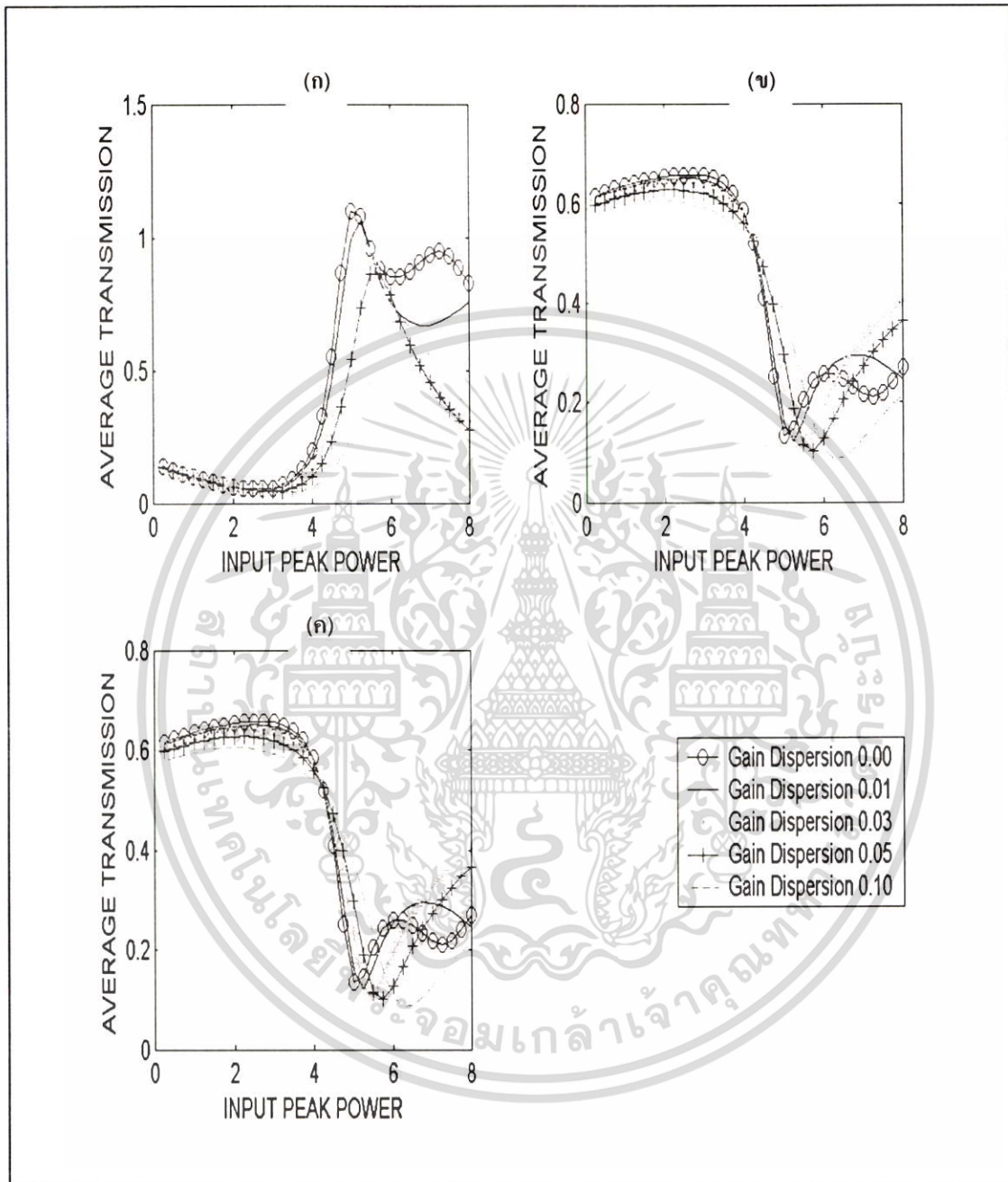
4.5.1 ผลการศึกษาของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัดที่ส่งผล ต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 ที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/2$ ($K = 1$, $\Gamma = 0.15$, $s = 0$)



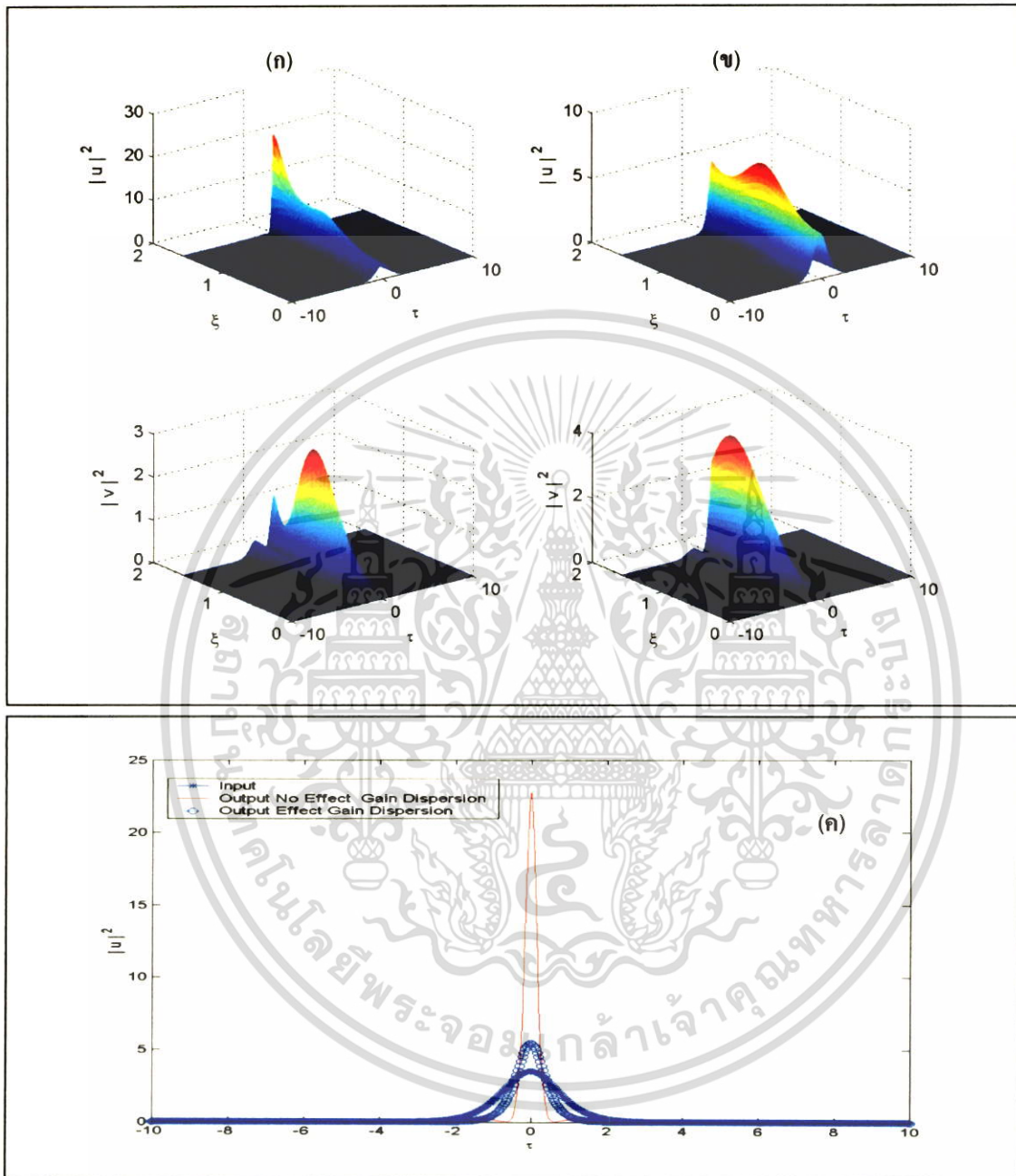
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของ คัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวปัด $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K=1, \Gamma=0.15, s=0$)



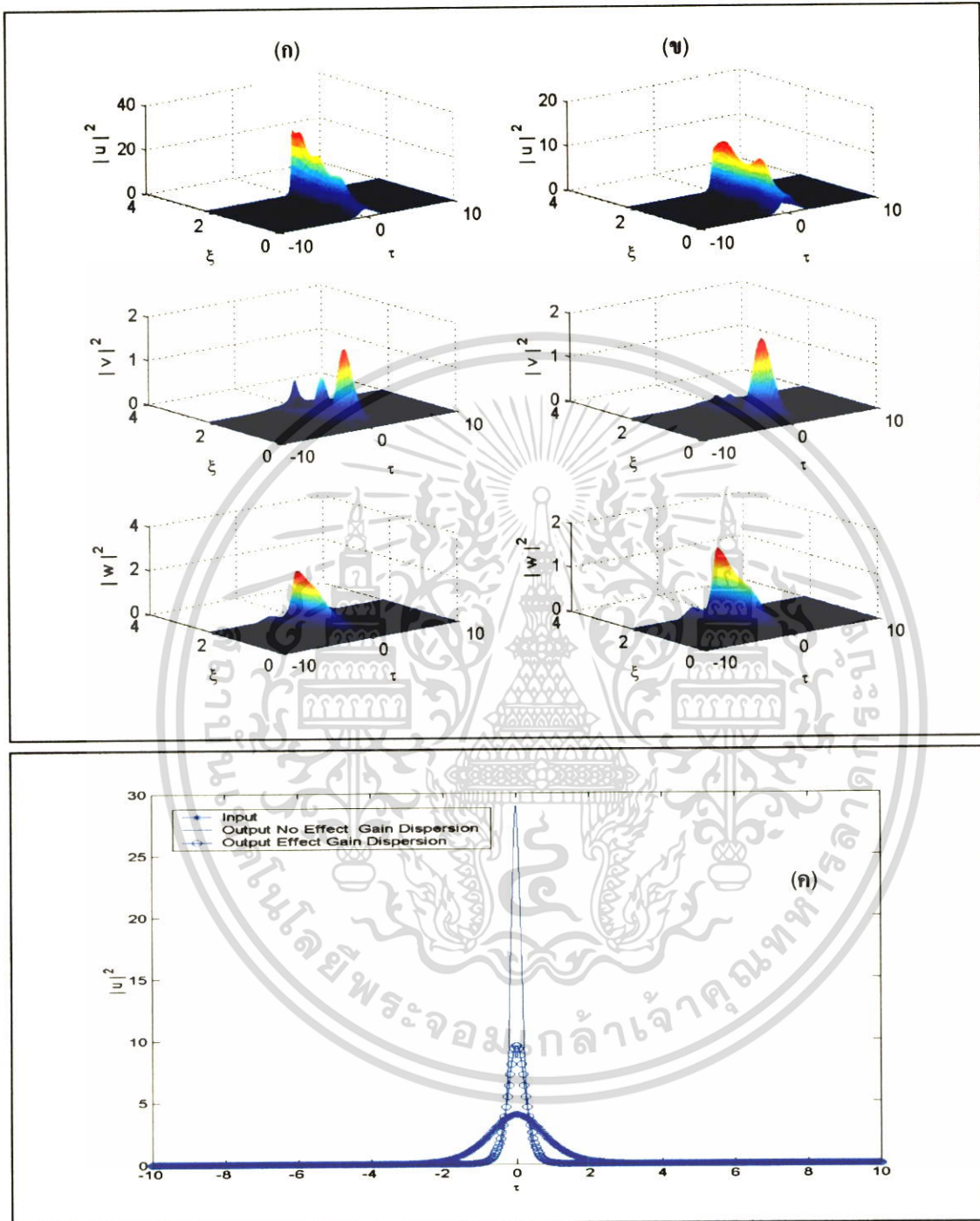
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกัดกำลังงานอินพุตของ
 ฟิลเตอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ μ
 (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/3$
 ($\kappa = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$)

จากรูปที่ 4.25 ถึง 4.27 เป็นการศึกษากรณีแบนด์วิดท์ที่จำกัด (Finite Gain Bandwidth) อันเนื่องจากการค้ำึงถึงแบนด์วิดท์ของพัลส์โซลิตอน (Bandwidth of the Pulse) ที่มีค่ามากพอ หรือมากกว่าค่าแบนด์วิดท์ของตัวกลาง (Bandwidth of the Gain Medium) ซึ่งเกิดในกรณีพัลส์วิดธ์ของโซลิตอนที่แคบมากๆ ดังนั้นแตรงค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุตจะได้รับเกนที่แตกต่างกันไป ส่งผลให้เกิดลักษณะการกระจายของเกน (Gain Dispersion) โดยการเลือกใช้ Γ เท่ากับ 0.15 แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าการกระจายของเกนผ่านพารามิเตอร์ μ พบว่าเมื่อ μ มากขึ้น ผลปรากฏว่าค่าการส่งผ่านสัญญาณมีลักษณะลดต่ำลง โดยเฉพาะที่กำลังงานอินพุตสูงๆทำให้ต้องใช้กำลังงานการสวิตช์ที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับค่า μ ที่ไม่มากนักค่ากำลังงานในการสวิตช์ก็น้อยกว่าในกรณีไม่ได้โฉบ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า μ มากขึ้นจะสอดคล้องกับความกว้างของพัลส์ (Pulse Width) ที่แคบลงมีผลทำให้สเปกตรัมของพัลส์ที่กว้างขึ้นทำให้อังค์ประกอบของพัลส์ที่ความถี่สูงได้รับเกนที่น้อยกว่าอังกค์ประกอบของพัลส์ที่ความถี่ต่ำที่อยู่ตรงกลางของพาราโบลาเกนแบนด์ (Parabolic Gain Band) ตามสมการ $G_i(\omega) = \Gamma - \mu\omega^2$ ผลที่ได้ทำให้พลังงานรวมของพัลส์ที่ได้จากสารตัวกลาง (medium) ลดลงสัญญาณที่ได้ จึงลดลงนั่นเอง กล่าวโดยสรุปเมื่อความกว้างพัลส์ยิ่งแคบสอดคล้องกับการกระจายของเกนที่มากขึ้น โดยค่าอัตราขยายรวมที่ได้จะลดลง ทำให้ต้องใช้กำลังงานในการสวิตช์ที่สูงมากขึ้น

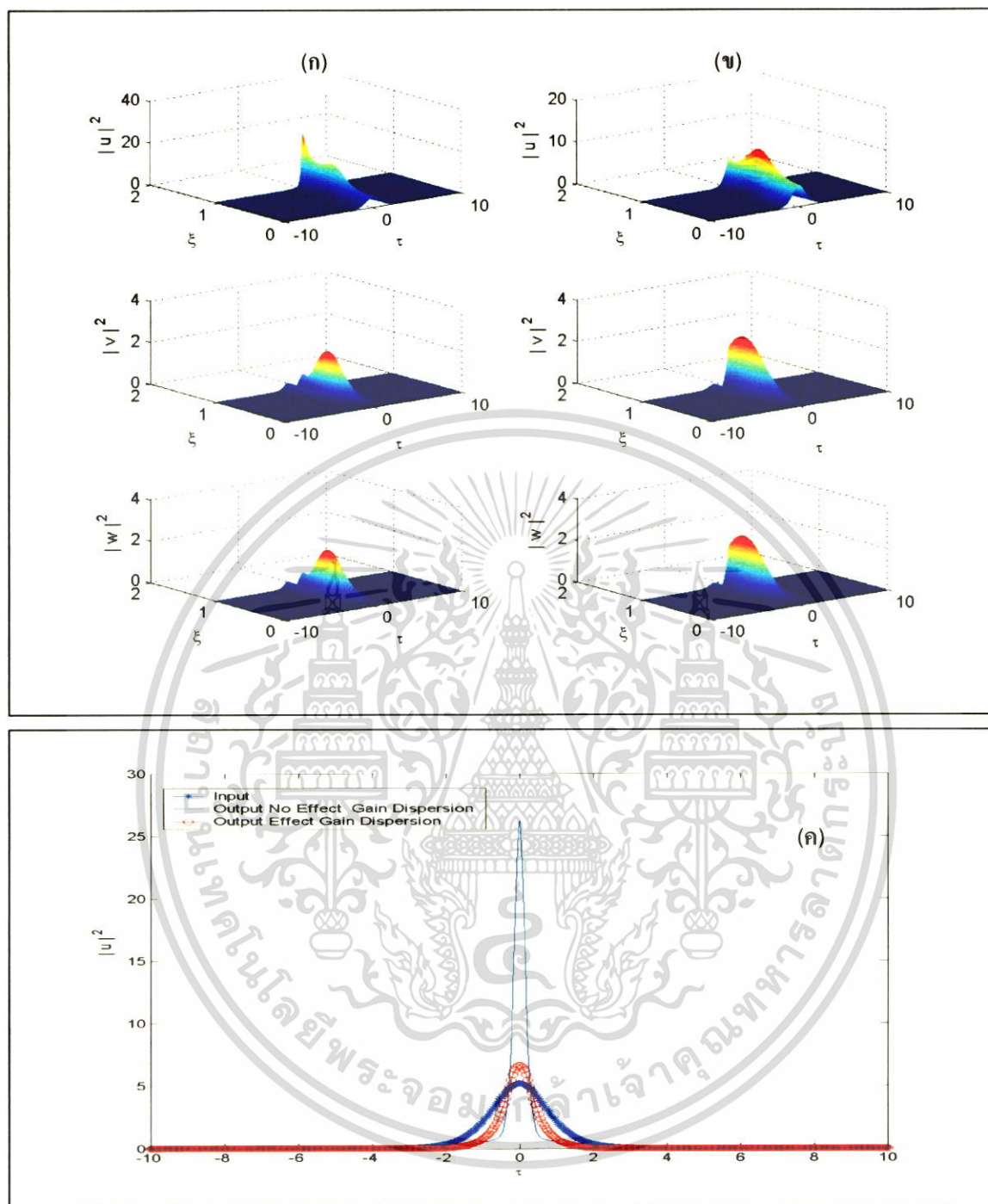
4.5.2 ผลการศึกษาแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัดต่อรูปสัญญาณโซลิตอนในคัปเปิลอร์ที่มีการโคป



รูปที่ 4.28 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกนอันเนื่องมาจากผลของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ก) $\mu = 0$ (ข) $\mu = 0.05$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบีตเท่ากับ $L_c = \pi/2$ ($K = 1$, $\Gamma = 0.15$, $s = 0$)



รูปที่ 4.29 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์อันเนื่องมาจากผลของ
 เกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 4.0 (ก) $\mu = 0$ (ข) $\mu = 0.05$ (ค) รูป
 สัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทาง
 ครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, s = 0$)

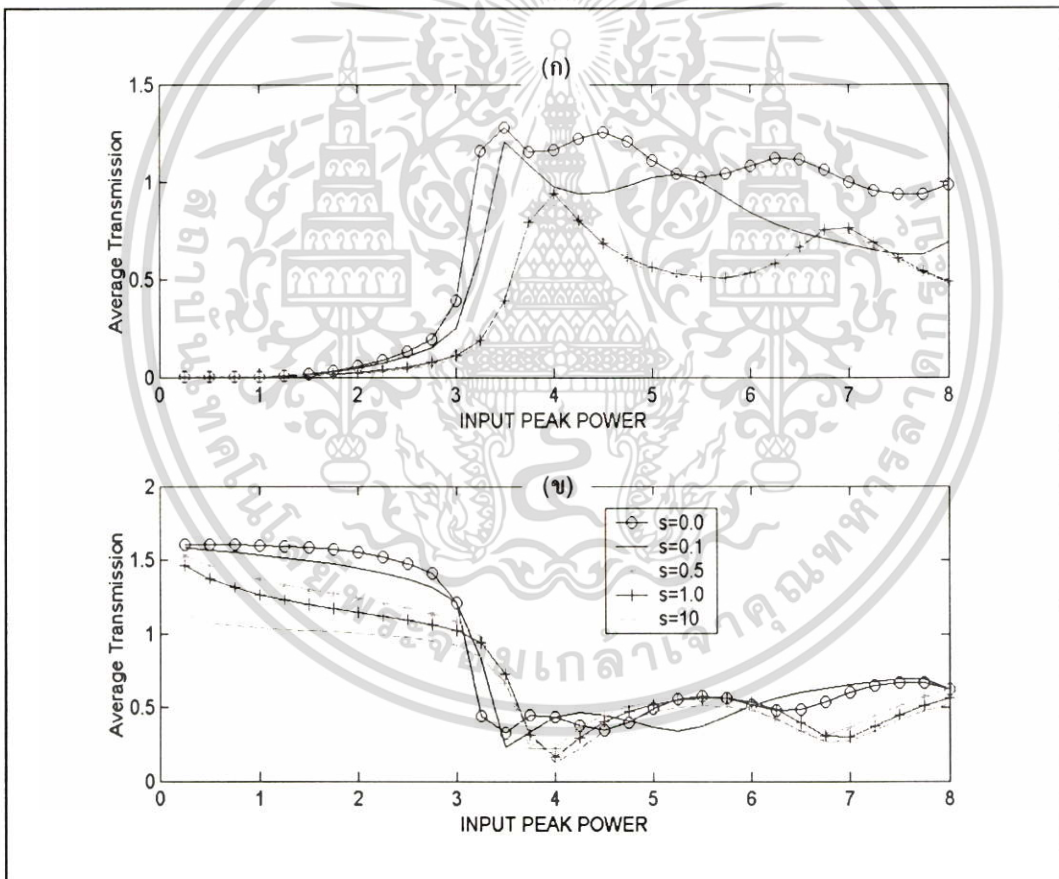


รูปที่ 4.30 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลเลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าเนื่อง
 จากผลของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัด ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2 (ก) $\mu = 0$ (ข) $\mu = 0.05$
 (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้นใช้ระยะ
 ทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/3$ ($K = 1$, $\Gamma = 0.15$, $s = 0$)

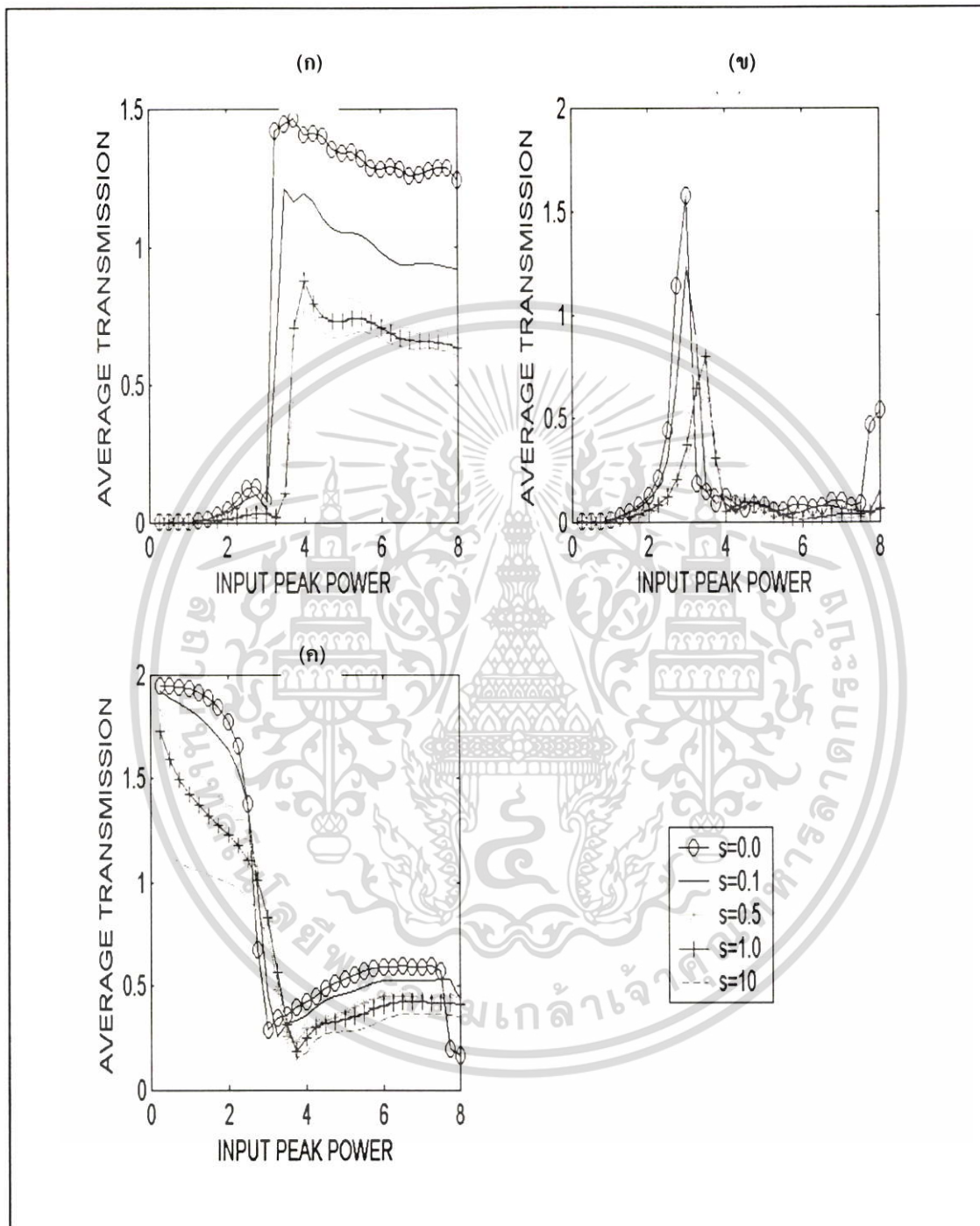
จากรูปที่ 4.28 ถึง 4.30 แสดงให้เห็นถึงผลของแกนแบนด์วิดท์ที่จำกัดหรือผลการกระจายของแกนของคัปเปิลอร์ทั้งสามชนิดโดยเลือกใช้ $\Gamma = 0.15$ และ $\mu = 0.05$ ในทุกกรณี สัญญาณขาออกมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งในกรณีคิดผลการกระจายและไม่คิดผลการกระจายของแกน โดยสัญญาณยังคงมีการขยาย สวิต และบีบอัดตัว แต่ผลของการกระจายของแกนทำให้ความเข้มของสัญญาณขาออกมีค่าลดลง ดังนั้นสรุปว่าผลของแกนแบนด์วิดท์ไม่มีผลต่อลักษณะรูปสัญญาณ แต่มีผลต่อการลดทอนความเข้มของสัญญาณ ทำให้ประสิทธิภาพในการสวิตลดลง

4.6 ผลการศึกษาการอิ่มตัวของแกน (Gain Saturation)

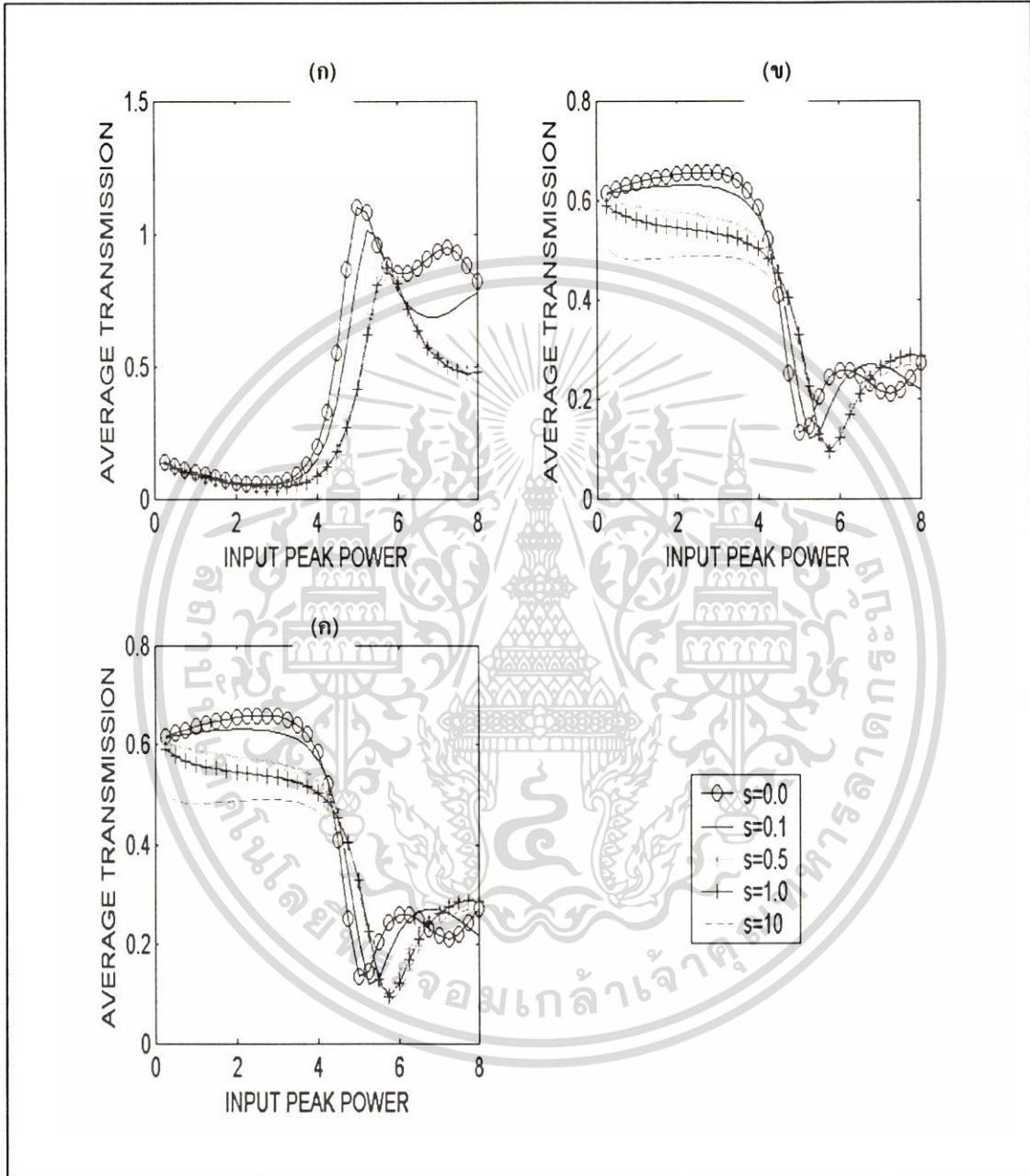
4.6.1 ผลการศึกษาการอิ่มตัวของแกนที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอน



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ s (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบีต $L_c = \pi/2$ ($K = 1$, $\Gamma = 0.15$, $\mu = 0$)



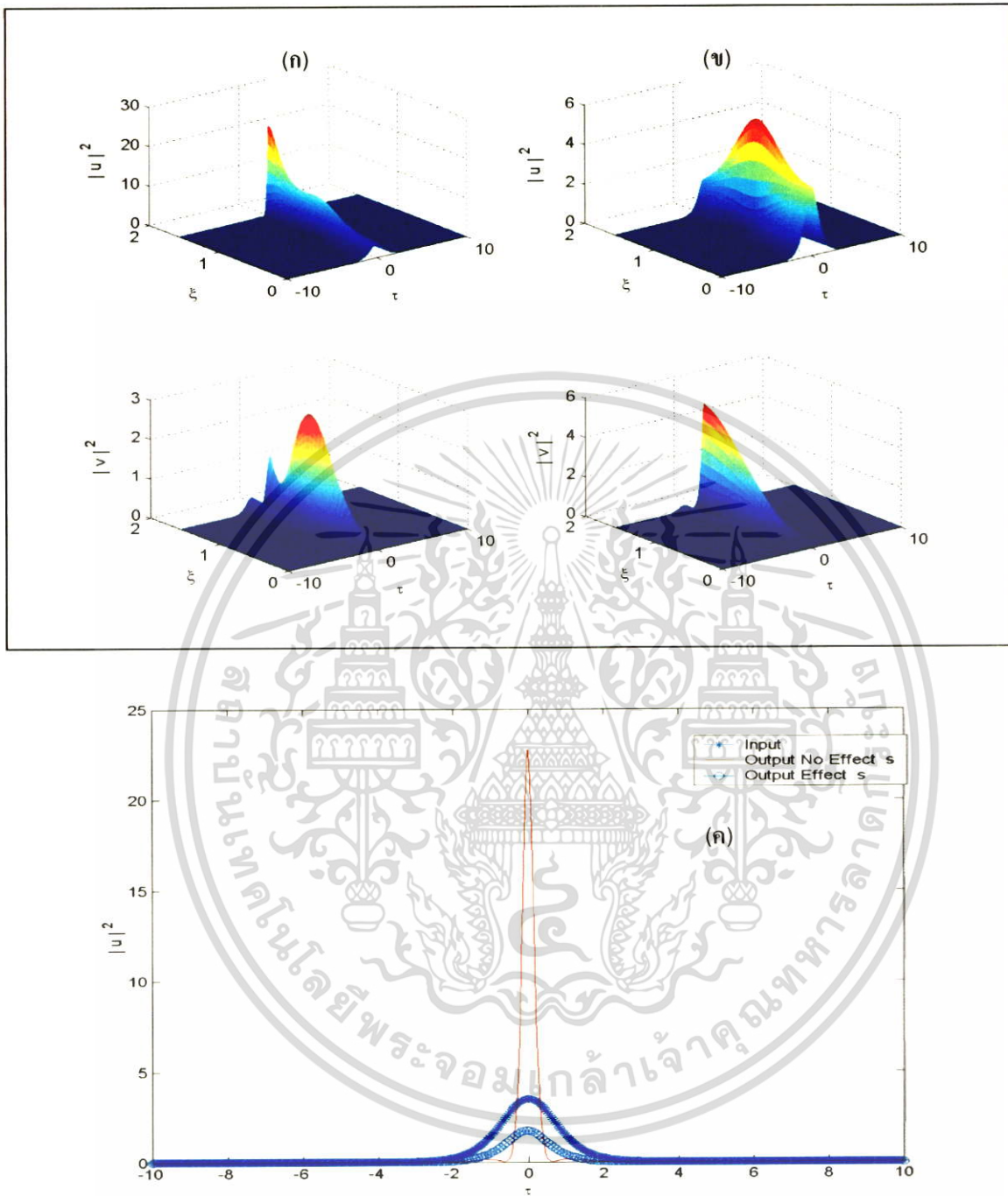
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับพิกัดกำลังงานอินพุตของ
 ฟิลเตอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ โดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ s (ก) แกน 1 (ข) แกน 2
 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิต $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$)



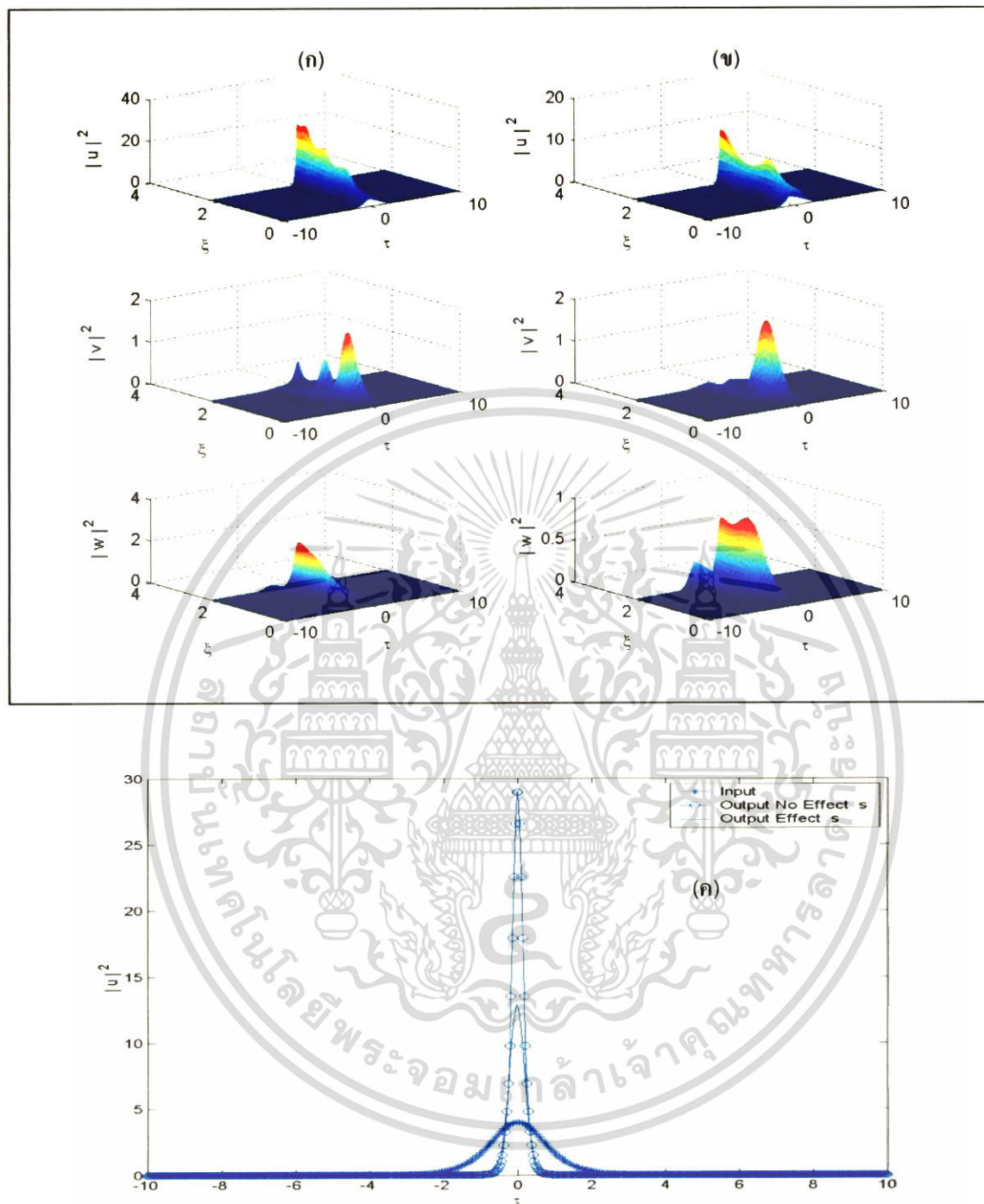
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ย กับ พิกกำลังงานอินพุตของ คัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ s (ก) แกน 1 (ข) แกน 2 (ค) แกน 3 ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบีต $L_c = \pi/3$ ($\kappa = 1, \Gamma = 0.15, \mu = 0$)

จากรูปที่ 4.31 ถึง 4.33 เป็นการศึกษากรณีการอิ่มตัวของเกน โดยการเลือกใช้ $\Gamma = 0.15$ และ $\mu = 0$ แล้วทำการปรับเปลี่ยนการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation) ผ่านพารามิเตอร์ s พิจารณาที่เกน 1 จะพบว่าเมื่อ s เพิ่มขึ้นค่าส่งผ่านสัญญาณมีค่าน้อยลง และต้องใช้กำลังงานในการสวิตเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการสวิตสัญญาณลดลง หากพิจารณาที่เกน 2 จะพบว่าเมื่อ s มากขึ้น ผลปรากฏว่าค่าการส่งผ่านสัญญาณมีลักษณะลดต่ำลงและความคมชัด (Sharpness) ของกราฟ ถูกทำให้เสียหายไปจากเดิม โดยความชันของกราฟจะลดลง ณ กำลังงานวิกฤตในการสวิต (Switching Critical Power) แสดงว่าเมื่อ s เพิ่มขึ้นต้องใช้พิกกำลังงานการสวิตกับคัปเปลอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมที่มากขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าค่า s ที่สูงกว่าจะมีการตอบสนองน้อยต่อค่าพิกกำลังงานที่เพิ่มขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าส่งผ่านสัญญาณน้อยมาก การใช้กำลังงานการสวิตที่สูงขึ้นอธิบายเหตุผลได้โดย สำหรับกรณีไม่มีคิดผลของการอิ่มตัวของเกน ก่านอนลิเนียร์เฟสชิฟ (Nonlinear Phase Shift) สำหรับคัปเปลอร์ที่มีการโคปมีค่าเป็น $\phi^{NL} \cong |u_0|^2 [\exp(2\Gamma L) - 1] / 2\Gamma$ แต่ในกรณี ที่คิดผลของการอิ่มตัวของเกนด้วยจะมีค่าเป็น $\phi^{NL} \cong |u_0|^2 [\exp(2g_p(\tau)L) - 1] / 2g_p(\tau)$ ซึ่งในการสวิตทางแสงเกิดได้เมื่อเฟส $\phi^{NL} > 2\pi$ สำหรับ $\Gamma > g_p(\tau)$ จะเห็นได้ว่าก่านอนลิเนียร์เฟสชิฟของกรณีค่า s ไม่เป็นศูนย์ จะมีค่าน้อยกว่ากรณี s เป็นศูนย์เสมอ ดังนั้นจะถึงจุดกำลังงานวิกฤตในการสวิตด้วยค่ากำลังงานค่าสูงกว่านั่นเอง[8]

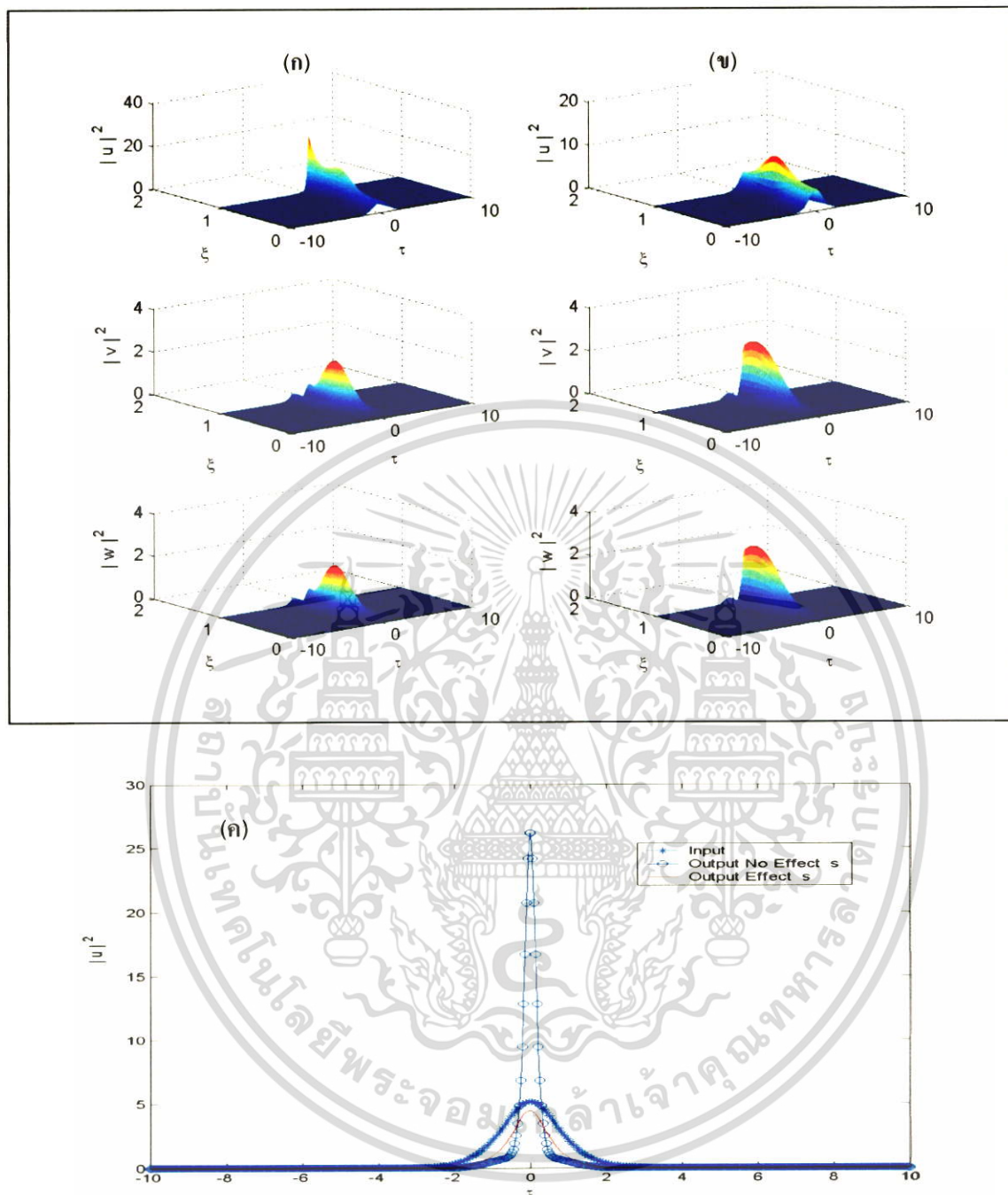
4.6.2 ผลการศึกษาการอิมิตัวของแกน ที่ส่งผลต่อรูปร่างของสัญญาณ



รูปที่ 4.34 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสองแกน เนื่องจากการอิมิตัวของแกน ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 3.5 (ก) $s = 0$ (ข) $s = 1$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/2$ ($K = 1$, $\Gamma = 0.15$, $\mu = 0$)



รูปที่ 4.35 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนอะเรย์อื่นเนื่องจากการอิมิตัวของแกน ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 4.0 (ก) $s = 0$ (ข) $s = 1$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวปิดเท่ากับ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ($K = 1$, $\Gamma = 0.15$, $\mu = 0$)



รูปที่ 4.36 แสดงรูปสัญญาณของพัลส์โซลิตอนในคัปเปิลอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าอันเนื่องจากการอิมิตัวของแกน ใช้กำลังงานอินพุตเท่ากับ 5.2 (ก) $s = 0$ (ข) $s = 1$ (ค) รูปสัญญาณขาออกของพัลส์โซลิตอนของแกน 1 ที่สัมพันธ์กับเฟสอินพุตข้างต้น ใช้ระยะทางครึ่งหนึ่งของความยาวบิตเท่ากับ $L_c = \pi/3$ ($K = 1$, $\Gamma = 0.15$, $\mu = 0$)

จากรูปที่ 4.34 ถึง 4.36 แสดงให้เห็นถึงผลของการอ้อมตัวของแกน ของคัปเพลอร์ทั้งสามชนิด โดยเลือกใช้ $\Gamma = 0.15$ และ $\mu = 0$ ในทุกกรณี จากรูปสำหรับ คัปเพลอร์แต่ละชนิดจะเห็นว่าลักษณะรูปสัญญาณมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยสัญญาณยังคงมีการขยาย สวิต และบีบอัดตัว เหมือนกรณีไม่มีผล การอ้อมตัวของแกน เพียงแต่ผลของการอ้อมตัวของแกนทำให้ความเข้มสัญญาณขาออกมีค่าลดลง โดยสรุปได้ว่า ผลของการอ้อมตัวของแกนไม่มีผลต่อลักษณะรูปสัญญาณ แต่ส่งผลต่อการลดทอนความเข้มของ สัญญาณ ทำให้ประสิทธิภาพในการสวิตลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติการสวิตของโซลิตอนในคัปเปอเรเตอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียม กรณีแบนด์วิดท์ไม่จำกัด (Infinite Gain Bandwidth) เป็นการพิจารณาผลของอัตราขยาย (Γ) โดยพิจารณา Γ เป็นค่าคงที่ อัตราขยายที่ได้จากคัปเปอเรเตอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียม ทำให้มีความคมชัดของสัญญาณในการสวิตมากกว่า (Sharper) คัปเปอเรเตอร์ที่ไม่ได้โคปมาก เมื่อ Γ มากขึ้นสัญญาณจะมีลักษณะคมชัดขึ้น และใช้กำลังในการสวิตน้อยลง โดยเฉพาะที่อัตราขยาย $\Gamma = 0.15$ จะให้สัญญาณที่มีความคมชัด (sharp) มากที่สุด ลักษณะการเป็นสวิตที่ดี โดยพิจารณากำลังงานการสวิตที่แกนที่ 1 สำหรับคัปเปอเรเตอร์ทั้งสามชนิดมีค่าเป็นดังนี้ สำหรับคัปเปอเรเตอร์ชนิดสองแกนที่ความยาวคัปเปอเรเตอร์ $L_c = \pi/2$ ค่าพิกกำลังงานการสวิต (Switching Power) ของพัลส์โซลิตอน มีค่า 3.60 3.44 3.30 3.16 และ 3.03 สำหรับคัปเปอเรเตอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ที่ความยาวคัปเปอเรเตอร์ $L_c = \pi/\sqrt{2}$ ค่าพิกกำลังงานการสวิต มีค่าเป็น 3.75 3.56 3.33 3.15 และ 2.96 และสำหรับคัปเปอเรเตอร์ชนิดสามแกนสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ความยาวคัปเปอเรเตอร์ $L_c = \pi/3$ ค่าพิกกำลังงานการสวิต มีค่าเป็น 5.14 4.96 4.78 4.62 และ 4.44 โดยกำลังงานสวิตทั้งสามกรณีดังกล่าวสอดคล้องกับ Γ ที่มีค่าเป็น 0.00 0.05 0.10 0.15 และ 0.20 ตามลำดับ

หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสวิตของคัปเปอเรเตอร์ทั้งสามแบบที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบิต จะพบว่าคัปเปอเรเตอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์จะใช้กำลังงานในการสวิตต่ำที่สุดและความคมชัดของสัญญาณการสวิตดีที่สุด โดยพิจารณาที่ Γ เดียวกัน โดยเฉพาะเมื่อ Γ ที่มากกว่า 0.15 และ คัปเปอเรเตอร์แบบสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าจะใช้กำลังงานการสวิตมากที่สุด แต่ค่าความคมชัดของสัญญาณการสวิตแย่ที่สุด ในส่วนของแนวโน้มของค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยเมื่อแกนสูงมากขึ้นค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยจะมากขึ้นในคัปเปอเรเตอร์ทั้งสามชนิด และสำหรับค่าแกนเดียวกันค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยจะมีค่ามากที่สุดสำหรับคัปเปอเรเตอร์ชนิดสามแกนแบบอะเรย์ และจะมีน้อยสุดสำหรับคัปเปอเรเตอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า เช่น กรณี $\Gamma = 0.15$ สัญญาณออกของค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยมีค่าพิกสูงมากถึง 120% 150% และ 110% สำหรับคัปเปอเรเตอร์ชนิดสองแกน สามแกนอะเรย์ และสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าตามลำดับ

พิจารณาความยาวคัปเปอเรเตอร์ที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาวบิตที่ยาวมากขึ้น แกนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กำลังงานที่ใช้ในการสวิตสัญญาณลดลง และกราฟชันมากขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ Γ ค่าเดียวกันจะ

เห็นได้ชัดว่ากำลังงานการสวิตของคัปเปอเรอร์ที่ยาวกว่าจะใช้กำลังงานการสวิตสัญญาณที่น้อยกว่ามาก และนอกจากนั้นหากพิจารณาการเพิ่มเกนที่ใช้โคปจะพบว่าค่าการส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยมากขึ้นและมากกว่ากรณีคัปเปอเรอร์ที่สั้นกว่า เป็นเพราะคัปเปอเรอร์ที่ยาวมากขึ้นได้รับออปติคอลลเกนที่มากกว่าเดิมนั่นเอง โดยปรกติคัปเปอเรอร์ที่ยาวกว่าจะให้คุณสมบัติการสวิตที่ดีกว่าทั้งในแง่ของกำลังงานการสวิต ความคมชัด และ ค่าส่งผ่านสัญญาณเฉลี่ยที่สูง แต่ในทางปฏิบัติไม่นิยมใช้คัปเปอเรอร์ที่ยาวมากนัก เพราะถูกสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ง่าย รวมไปถึงติดตั้งที่ยุ่งยากกว่า

สำหรับคัปเปอเรอร์ทั้งสามชนิดเมื่อเพิ่มเกนมากขึ้นสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือสัมพันธ์กับความกว้างพัลส์สัญญาณ (Pulse Width) ขาออกที่แคบลง ทั้งนี้เนื่องมาจากโซลิตอนจะพยายามปรับความกว้างพัลส์ในขณะที่มันถูกขยายสัญญาณเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการเคลื่อนตัวของโซลิตอน นั่นคือเกนจะส่งผลต่อความกว้างพัลส์ขาออกโดยขึ้นกับกำลังงานอินพุตที่ใช้ และคัปเปอเรอร์ชนิดสามแกนแบบสามเหลี่ยมด้านเท่ามีอัตราส่วนการบีบอัดที่ต่ำเมื่อเทียบกับคัปเปอเรอร์ชนิดสองแกนและคัปเปอเรอร์ชนิดสามแกนอะเรย์ซึ่งมีสัดส่วนการบีบอัดสัญญาณมากที่สุดถึง 15 เท่า

กรณีเกนแบนด์วิดท์ที่มีค่าจำกัดอันเนื่องจากการพิจารณาแบนด์วิดท์ของพัลส์โซลิตอน (Bandwidth of the Pulse) หรือกรณีพัลส์วิดท์โซลิตอนที่แคบมากๆ เมื่อการกระจายของเกน μ เพิ่มขึ้น ผลปรากฏว่าค่าการส่งผ่านสัญญาณมีความคมชัดลดลงและค่าส่งผ่านสัญญาณลดต่ำลง ต้องการกำลังงานการสวิตจะสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกำลังงานในการสวิตก็ยังน้อยกว่าในกรณีไม่ได้โคป ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า μ มากขึ้นจะสอดคล้องกับความกว้างของพัลส์ (Pulse Width) ที่แคบลงหรือสเปกตรัมของพัลส์ที่กว้างขึ้น ทำให้ห้องประกอบของพัลส์ที่มีความถี่สูงได้รับเกนที่น้อยกว่าองค์ประกอบของพัลส์ที่มีความถี่ต่ำที่อยู่ตรงกลางของพาราโบลาเกนแบน (Parabolic Gain Band) ผลที่ได้ทำให้พลังงานรวมของพัลส์ที่ได้จากตัวกลางลดลง สัญญาณที่ได้จึงลดลง กล่าวโดยสรุปเมื่อพัลส์ยังแคบสอดคล้องกับการกระจายของเกนที่มากขึ้น ค่าเกนรวมที่ได้จะลดลงทำให้ต้องใช้กำลังงานในการสวิตที่สูงมากขึ้น

สำหรับกรณีการอิ่มตัวของเกน โดยการอิ่มตัวของเกน (Gain Saturation) ผ่านพารามิเตอร์ s พิจารณาที่เกน 1 จะพบว่าเมื่อ s เพิ่มขึ้นค่าส่งผ่านสัญญาณมีค่าน้อยลง และต้องใช้กำลังงานในการสวิตเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการสวิตสัญญาณลดลง หากพิจารณาที่เกน 2 จะพบว่าเมื่อ s มากขึ้น ผลปรากฏว่าค่าการส่งผ่านสัญญาณมีลักษณะลดต่ำลงและความคมชัด (Sharpness) ของกราฟ ถูกทำให้เสียหายไปจากเดิม โดยความชันของกราฟจะลดลง ณ จุดกำลังงานวิกฤตในการสวิต (Switching Critical Power) แสดงว่าเมื่อ s เพิ่มขึ้นต้องใช้พิกกำลังงานการสวิตกับคัปเปอเรอร์ที่โคปด้วยเออร์เบียมที่มากขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าค่า s สูงกว่าจะมีการตอบสนองน้อยต่อค่าพิกกำลังงานที่เพิ่มขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าส่งผ่านสัญญาณน้อยมาก การใช้กำลังงานการสวิตที่สูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลของโปรแกรมถ้าต้องการความถูกต้องมากยิ่งขึ้นควรประมวลผลที่ความละเอียดในมิติของเวลาที่ 512 จุดขึ้นไป โดยเฉพาะกรณีใช้อัตราขยายค่าสูงๆ แต่ต้องใช้เวลาค่อนข้างนาน และกรณีเกิดการอิมพัลส์ของเกนจะเป็นกรณีที่รันโปรแกรมจนที่ความละเอียดจุดต่อในมิติของเวลาที่เท่ากัน และ ควรใช้คอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลได้รวดเร็วและ มีการระบายอากาศที่ดี เพราะจากโปรแกรมนี้อาจทำให้เวลารันหลายวันเลยทีเดียว ซึ่พียูจะต้องประมวลผลค่อนข้างหนัก ในส่วนของโปรแกรม อาจทำการปรับปรุงโปรแกรมให้รันผลได้รวดเร็วขึ้น หรืออาจเปลี่ยนไปใช้ภาษาซี หรือ ภาษาฟอร์แทรน เพราะภาษาพวกนี้จะประมวลผลเร็วกว่าโปรแกรม แมทแล็บ

5.3 แนวทางการวิจัยและการพัฒนา

เราอาจทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบอื่นๆได้อีก เช่น ผลของ Self-Frequency Shift , Third-Order Dispersion และ Intermodal Dispersion อีกตัวอย่างที่น่าสนใจคือ Soliton generation in a dual-channel mode-locked fiber laser โดยมีระบบสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + \kappa v + |u|^2 u &= i \frac{1}{2} g L_D \left(u + \tau_2^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} \right), \\ i \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2} + \kappa(u + w) + |v|^2 v &= 0, \\ i \frac{\partial w}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + \kappa v + |w|^2 w &= i \frac{1}{2} g L_D \left(w + \tau_2^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} \right) \end{aligned}$$

เมื่อ u , v และ w คือองค์ประกอบของนอร์มัลไรซ์เอนเวลลอปของพัลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงช้าๆ ในแกนเส้นใน แกนเส้นกลาง และแกนเส้นนอก ตามลำดับ โดยให้ u และ w คือ แอมพลิจูดในแกนแอคทีฟ (Active) หรือแกนออกทั้งสองด้าน โดยมีแกนกลางเป็นแกนพาสซีฟ (Passive) เมื่อแกนพาสซีฟคือแกนที่ไม่ได้โคปสารเออร์เบียม ส่วนแกนแอคทีฟคือแกนที่โคปสารเออร์เบียม ξ คือโคออร์ดิเนตของตำแหน่ง τ คือเวลาที่เคลื่อนที่ในกรอบอ้างอิงของความเร็วกลุ่ม K คือสัมประสิทธิ์ในการคัปปลิงเชิงเส้น L_D คือระยะทางในการกระจาย τ_2 คืออัตราขยายของแบนด์วิดธ์ และ g คืออัตราขยายขณะอิมพัลส์ และ $g = g_0 \exp(-E_p/E_{sat})$ โดย g_0 คือสัมประสิทธิ์ของอัตราขยายไม่อิมพัลส์ E_p คือกำลังงานของพัลส์ และ E_{sat} คือกำลังงานของพัลส์ขณะอิมพัลส์

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นต่อไปนี้

$$u(\xi = 0, \tau) = \sqrt{P_{\max}} \operatorname{sech}(\tau),$$

$$v(\xi = 0, \tau) = w(\xi = 0, \tau) = 0$$

เมื่อ P_{\max} คือ พิกกำลังอินพุต

ระบบสมการดังกล่าวคล้ายกับระบบสมการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เราสามารถใช้แบบจำลองในการคำนวณเพื่อออกแบบสร้างไฟเบอร์เลเซอร์(Fiber Lasers) โมคัลลอคโดยใช้สัญญาณ โซลิตอนได้





```

% transmission.m %need to call nlsrun_noplotHBL2coreVarTor.m
clear
global N
global tau1
global tau2
global kappa
global tor
global mu
global powerin
kappa=1;
tor=0;
NUMPOWER=32;
LASTPOWER=8.0;
for indx=1:NUMPOWER
    powerin=indx*LASTPOWER/NUMPOWER;
    nlsrun_noplotHBL2coreVarTor;%ใส่ให้สอดคล้องกันกับไฟล์ที่จะเรียก
    absv=abs(v).^2;
    absu=abs(u).^2;
    absufirst(indx,:)=absu(1,:);
    absvfirst(indx,:)=absv(1,:);
    absuend(indx,:)=absu(end,:);
    absvend(indx,:)=absv(end,:);
    firstu=trapz(tau,absu(1,:));
    firstv=trapz(tau,absv(1,:));
    intu=trapz(tau,absu(end,:));
    intv=trapz(tau,absv(end,:));
    nortransmissionu(indx)=intu/(intu+intv);
    nortransmissionv(indx)=intv/(intu+intv);
    transmissionu(indx)=intu/(firstv+firstu);

```

```

transmissionv(indx)=intv/(firstv+firstu);
save HBLvartor0K1
end
inputpow=(1:NUMPOWER)*LASTPOWER/NUMPOWER;
plot(inputpow,transmissionu,'-ob');
legend('Gain Coefficients 0.00');
xlabel('INPUT PEAK POWER');ylabel('AVERAGE TRANSMISSION');

%nlrun_noplotHBL2coreVarTor.m Solving Coupled Nonlinear Schrodinger's Equations
%using Method of Lines.% Parameters needed by NLS equation function (nlseq5point2core.m).
global N %gain saturation not include here
global tau1
global tau2
global kappa
global tor
global mu
%global s
%global tau % global powerin % this will be set outside
% N=input('Number of discretization points (try 64) = ');
N=512;%ต้องการละเอียดแนะนำเป็น 128 ขึ้นไป
tau1=-10; % Initial tau
tau2=10; % Last tau
%kappa=0.5; %สำหรับ one beat length
%tor=0.15;%gain
mu=0;%gain dispersion
%powerin=1;
%s=0.1;
% Initial condition. (xi=0)

```

```

tau=linspace(taui,tauf,N+2);    % (First and last points will be chopped)
tauN=tau(2:N+1);    % only N points will need to be calculated.
% Point 0 and N+1 are boundary. % Initial conditions.
ui=sqrt(powerin)*sech(tauN);
% subplot(2,1,1);plot(tauN,abs(ui).^2)
% xlabel('\tau');ylabel('u');
vi=0.*tauN; % We have to combine u and v as a single vector % before calling ODE45.
zi=[ui vi];
xilast=pi/(2*kappa); %L=pi/kappa
xipts=32;    % Number of xi points.
[xi,zout]=ode45('NLSEQ5point2core',linspace(0,xilast,xipts),zi);%chose for call
% Boundary condition
zvec=0.*xi;    % u,v = 0 at boundary. % Split u and v, and include the values at the boundary.
u=[zvec zout(:,1:N) zvec];
v=[zvec zout(:,N+1:end) zvec];

function dz=nlseq5point2core(xi,z)
% Function for Nonlinear Schrodinger Equations. % Parameter declared in equation solver script(s).
% N = Number of in between points. % tau_i = Initial tau. % tau_f = Last tau.
global N
global tau_i
global tau_f
global kappa
global tor
global mu
global powerin
h=(tau_f-tau_i)/(N+1);    % subinterval range.% For simplicity, we can split z into u and v
u=z(1:N);

```

```

v=z(N+1:end);%%%% We will calculate derivative of u first.% First point is special
du(1,1)=(i*0.5 + mu)*(- 30*u(1)+16*u(2)- u(3))/12/h/h + i*(kappa*v(1) +
abs(u(1))^2*u(1))+tor*u(1);
du(2,1)=(i*0.5 + mu)*(16*u(1)- 30*u(2)+16*u(3)- u(4))/12/h/h + i*(kappa*v(2) +
abs(u(2))^2*u(2))+tor*u(2); % In-between is no problem
for j=3:(N-2)
    du(j,1)=(i*0.5 + mu)*(-u(j-2) + 16*u(j-1)-30*u(j) + 16*u(j+1)- u(j+2))/12/h/h+i*(kappa*v(j) +
abs(u(j))^2*u(j)) + tor*u(j);
end % Last point is also special
du(N-1,1)=(i*0.5+mu)*(-u(N-3) + 16*u(N-2) - 30*u(N-1)+16*u(N))/12/h/h + i*(kappa*v(N-1) +
abs(u(N-1))^2*u(N-1))+tor*u(N-1);
du(N,1)=(i*0.5+mu)*(-u(N-2) + 16*u(N-1) - 30*u(N))/12/h/h + i*(kappa*v(N) +
abs(u(N))^2*u(N))+tor*u(N);
%%%% Then, we calculate derivative of v. % First point is special
dv(1,1)=(i*0.5 + mu)*(- 30*v(1)+16*v(2)- v(3))/12/h/h + i*(kappa*u(1) +
abs(v(1))^2*v(1))+tor*v(1);
dv(2,1)=(i*0.5 + mu)*(16*v(1)- 30*v(2)+16*v(3)- v(4))/12/h/h + i*(kappa*u(2) +
abs(v(2))^2*v(2))+tor*v(2); % In-between is no problem
for j=3:(N-2)
    dv(j,1)=(i*0.5 + mu)*(-v(j-2) + 16*v(j-1)-30*v(j) + 16*v(j+1)- v(j+2))/12/h/h+i*(kappa*u(j) +
abs(v(j))^2*v(j)) + tor*v(j);
end % Last point is also special
dv(N-1,1)=(i*0.5+mu)*(-v(N-3) + 16*v(N-2) - 30*v(N-1)+16*v(N))/12/h/h + i*(kappa*u(N-1) +
abs(v(N-1))^2*v(N-1))+tor*v(N-1);
dv(N,1)=(i*0.5+mu)*(-v(N-2) + 16*v(N-1) - 30*v(N))/12/h/h + i*(kappa*u(N) +
abs(v(N))^2*v(N))+tor*v(N); %%%%% Reconstruct the result
dz=[ du
    dv ];

```

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Romagnoli, S. Trillo, and S. W. Wabnitz.(1992). “**Soliton Switching in Nonlinear Couplers**” Opt. Quantum Electron. vol. 24, pp. 1237–1267.
- [2] J. M. Soto-Crespo and E. M. Wright. (1991).“**All-Optical Switching of Solitons on Two- and Three-Core Nonlinear Fiber Couplers**” J. Appl. Phys., vol.70, pp. 7240–7243.
- [3] J. Wilson, G. I. Stegeman, and E. M. Wright(1992).“**All-optical switching of solitons in an active nonlinear directional coupler**” Opt. Quantum Electron., vol. 24, pp. 1325–1336.
- [4] S.Trillo,S.Wabnitz.,E.M. Wright,and G.I.Stegeman,1988,Opt.lett.13,672.
- [5] J. Wilson, G.I. Stegeman, E.M. Wright. (1991).“**Soliton switching in an erbium-doped nonlinear fiber coupler**” Opt. Lett, Vol. 16, pp.1653-1655
- [6] S.Trillo and S.Wabnitz.,1991,“**Weak-Pulse-Activated Coherent Soliton Switching in Nonlinear Couplers**”,Opt.Lett.,vol.16 no.1,pp.1-3.
- [7] P.A. Buah and B.M.A. Rahman.(1997). “**Numerical Study of Soliton Switching in Active Three-Core Nonlinear Fiber Couplers**” IEEE J. Quantum Electron,vol.33 ,pp.874-878.
- [8] M.Liu,P.Shum. “**Effects of gain saturation on short pulse propagation in an erbium-doped nonlinear two-core fiber**”Opt Commun.236 (2004) pp.373-377.
- [9] M.Liu,P.Shum. “**Effects of Intermodal Dispersion on Short Pulse Propagation in an Active Nonlinear Two-Core Fiber Coupler**”IEEE Photon.Technol.Lett.,vol.16 (2004) pp.1080-1082
- [10] Isam ,M.N.,1992,**Ultrafast Fiber Switching Devices and Systems**,Cambridge University Prass,pp.1-102.
- [11] Schiesser , W. E. , " **Computational Mathematics in Engineering and Applied Science**," CRC Press, 1994
- [12] F.Kh.Abdullaev.R.M.Abrarov,and S.A.Darmanyany,1989, “**Dynamics of solitons in coupled optical fibers**”Opt.Lett.14,vol.14 no.2,pp.131-133.
- [13] Agrawal ,G.P.,”**Applications of Nonlinear Fiber Optics**”Academic press,2001.
- [14] Newell,A.C. and Moloney,J.V. ,**Nonlinear Optics**,ATIMS,California,1992
- [15] Hasagawa,A. and Kodama,Y.,**Soliton in Optical Communications**,1995,Clarendon Press,Oxford,pp.7-42.

- [16] N. N. Akhmediev and A. Ankiewicz. **Soliton : Nonlinear Pulses and Beams.** CHAPMAN & HALL. 1997.
- [17] N. J. Smith and N. J. Doran. “**Picosecond Soliton Transmission Using Concatenated Nonlinear Optical Loop Mirror Intensity Filter.**” *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 12, 1995, pp.1117 - 1125.
- [18] N. N. Athmediev and A. V. Buryak. “**Soliton States and Bifurcation Phenomena in Three-Core Nonlinear Fiber Couplers.**” *J. Opt. Soc. B*, Vol. 11, 1994, pp. 804-809.
- [19] F. Garzia, C. Sibilila and M. Bertolotti. “**All - Optical Serial Switcher.**” *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 32, 2000, pp. 781-798.
- [20] H. Hatami-Hanza, P. L. Chu, and G. D. Peng. “**Optical Switching in a Coupler with Saturable Nonlinearity.**” *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 26, 1994, pp. S365-S372.
- [21] A. V. Buryak and N. N. Akhmediev. “**Stationary Pulse Propagation in N - Core Nonlinear Couplers.**” *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 31, 1995, pp. 682-688.
- [22] P. E. Lan Gridge and W. J. Firth. “**Continuous Wave and Pulse Propagation in Three-Core Fiber Nonlinear Directional Couplers.**” *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 24, 1992, pp. 1315-1323.
- [23] E. M. Eguchi, K. Hayata, and M. Koshiba. “**Analysis of Soliton Pulse Propagation in a Birefringent Optical Fiber Using the Finite-Element Method.**” *Electron. Commun. Jpn.*, Part 2 , Vol. 73, 1990, pp. 50-59.
- [24] P. Saucez, A. Vande Wouwer, and W. E. Schiesser. “**Some Observations on Static Spatial Remeshing Method Based on Equidistribution Principles**” *J. of Computational Physics*, Vol. 128, pp. 274-288, 1996.
- [25] G. J. Borse. **Numerical Methods with MATLAB.** PWS. 1997.
- [26] Scheuer J. and Orenstein, M., “**Interaction and Switching of Spatial Soliton Pairs in the Vicinity of a Nonlinear Interface**”, *Opt. Lett.*, vol.24,no.23,pp.1735-1737.

ประวัติผู้เขียน

นายชัยณรงค์ เต็มพานิช เกิดวันที่ 5 มิถุนายน 2516 ที่จังหวัดชลบุรี ได้รับความศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและปลายที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2539 ปัจจุบันรับราชการประจำอยู่ที่ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

