



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การศึกษาการสื่อสัญญาณโซลิตอนแสงอุดมคติ
ในเส้นใยแสงที่มีอัตราสูญเสียกำลังให้มีขึ้นจริง
โดยวิธีขยายกำลังแบบแจกแจงผ่านปรากฏการณ์
รามานโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โดย

พสุ แก้วปลั่ง

มิถุนายน 2549

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การศึกษาการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนแสงอุดมคติในเส้นใยแสงที่มี

อัตราสูญเสียกำลังให้มีขึ้นจริงโดยวิธีขยายกำลังแบบแจกแจง

ผ่านปรากฏการณ์รามานโดยการจำลองทางคณิตศาสตร์

A Simulation Study on Realization of Ideal

Optical Soliton Transmission in Lossy Optical Fiber

by Distributed Raman Amplification

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

มิถุนายน ๒๕๔๙

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบใจผู้ช่วยวิจัยจำนวน 2 คนของข้าพเจ้า คือ นายปรีดา จารุภูมิ และนายเอกชัย คงบุญโสด ที่ช่วยเป็นภาระในการทำการจำลองทางคณิตศาสตร์ เก็บข้อมูล ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ รวบรวมผล และจัดรูปแบบในการนำเสนอข้อมูล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนแสงอุดมคติในเส้นใยแสงที่มีอัตราสูญเสีย

กำลังให้มีขึ้นจริงโดยวิธีขยายกำลังแบบแจกแจงผ่านปรากฏการณ์รามานโดยการจำลองทาง

คณิตศาสตร์

ชื่อผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ มิถุนายน ๒๕๔๙

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการใช้เทคนิค Distributed Raman Amplification (DRA) ในการขยายสัญญาณโซลิตอนแสงเพื่อทำให้โซลิตอนแสงเข้าสู่ความเป็นอุดมคติซึ่งหมายถึงโซลิตอนแสงซึ่งเดินทางในเส้นใยแสงที่ไม่มีอัตราการสูญเสียพลังงาน การศึกษานี้จะใช้วิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะให้ผลการศึกษาถูกต้องกว่ารายงานวิจัยที่ได้มีการรายงานและถูกอ้างอิงอย่างกว้างขวางมาก่อนหน้านี้ ในโครงการวิจัยนี้ อัตราขยายของ DRA ที่ต้องการจะถูกออกแบบอย่างถูกต้องโดยการแก้ระบบสมการของ DRA โดยวิธีการเชิงเลขซึ่งจะสามารถคิดรวมผลของการสูญเสียกำลังงานของ Pump laser และสัญญาณโซลิตอนในขณะที่อยู่ในกระบวนการถ่ายเทพลังงานได้ จากผลที่ได้รับจากการวิจัย พบว่าการขยายสัญญาณโซลิตอนโดยวิธี DRA นั้นเป็นกระบวนการแบบ Non-Adiabatic เท่านั้น ดังนั้น การขยายสัญญาณโซลิตอนโดย DRA นั้นจึงให้ผลเหมือนกับการขยายโซลิตอนโดยวิธี Lump amplification ซึ่งอัตราส่วนระหว่างคาบของการขยายและคาบโซลิตอนมีผลเด่นชัดในการจำกัดระยะทางที่จะสามารถสื่อสารสัญญาณได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการขยายสัญญาณโซลิตอนด้วยวิธี DRA กับวิธี Lump amplification แล้ว ที่อัตราส่วนระหว่างคาบของการขยายและคาบโซลิตอนเท่ากัน ผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิค DRA ในการขยายสัญญาณโซลิตอน ทำให้โซลิตอนเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติคล้ายกับเดินทางบนเส้นใยแสงที่ไม่มีอัตราการสูญเสียกว่าการใช้ EDFA เนื่องจาก DRA ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอนในช่วงการขยายสัญญาณ ทำให้เกิด Dispersive wave หลุดออกจากสัญญาณโซลิตอนปริมาณไม่มากนัก นอกจากนี้ยังเป็นเพราะ DRA สร้างสัญญาณรบกวนปริมาณที่น้อยกว่าวิธี Lump amplification จึงมีผลทำให้สัญญาณโซลิตอนที่ถูกขยายด้วย DRA จะสามารถสื่อสารสัญญาณไปได้ไกลกว่า

Project Title A Simulation Study on Realization of Ideal Optical Soliton Transmission in Lossy Optical Fiber by Distributed Raman Amplification

Name of the Investigator Assistant Professor Dr. Pasu Kaewplung

Year June 2006

Abstract

Optical soliton, amplified by the distributed Raman amplification (DRA), is numerically studied using more accurate method than previous works. In our work, the DRA gain is actually designed by numerically solving the DRA equations, which include both the pump depletion and the soliton depletion. Our results predict that only the non-adiabatic region exists for the soliton amplification by DRA. The soliton behavior in the chain of DRA is found to be identical to the soliton amplification using the lump amplification, where the ratio of the amplifier span and the soliton period plays a dominant role in limiting the transmission distance. However, comparing to the lump amplification at the same ratio of the amplifier span and the soliton period, our simulation results demonstrate that better transmission result is achieved by the DRA than the lump amplification due to smaller soliton power fluctuation that helps reducing the dispersive wave radiated from the soliton signal, as well as smaller amount of generated amplifier noise.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

รายการ	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ii
บทคัดย่อ.....	iii
Abstract.....	iv
สารบัญ.....	v
รายการตารางประกอบ.....	vi
รายการภาพประกอบ.....	vii
รายการสัญลักษณ์.....	xii
บทที่ 1: บทนำ.....	1
บทที่ 2: การเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงและการกำเนิดโซลิตอน.....	5
บทที่ 3: การขยายสัญญาณโซลิตอน.....	15
บทที่ 4: การออกแบบ DRA เพื่อขยายสัญญาณโซลิตอนโดยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์.....	21
บทที่ 5: ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณโซลิตอนเดินทางในระบบเส้นใยแสง.....	39
บทที่ 6: สรุปผลการวิจัย.....	48
หนังสืออ้างอิง.....	50
ผลของงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ.....	51
ภาคผนวก: รวมบทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ.....	52

รายการตารางประกอบ

รายการ	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย.....	22
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย.....	22
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้ I_{pk} ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย.....	22
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้ δS ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย.....	23
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย.....	23
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้การเปลี่ยนแปลง I_{pk} ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบ ตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย.....	23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการภาพประกอบ

รายการ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเส้นใยแสงชนิด step-index.....	5
รูปที่ 2.2. การเดินทางของพัลส์ในเส้นใยแสงเมื่อได้รับผลกระทบของการสูญเสีย.....	6
รูปที่ 2.3 คุณลักษณะของการสูญเสียในเส้นใยแสงชนิด single mode.....	6
รูปที่ 2.4 การเดินทางของพัลส์ในเส้นใยแสงเมื่อได้รับผลกระทบของ β_2	7
รูปที่ 2.5 คุณลักษณะของ β_2 ในเส้นใยแสงชนิด single mode.....	8
รูปที่ 2.6 การเดินทางของพัลส์ในเส้นใยแสงเมื่อได้รับผลกระทบของ TOD.....	8
รูปที่ 2.7 การขยายตัวของสเปกตรัมเนื่องจาก SPM ในเส้นใยแสง.....	9
รูปที่ 2.8 การเดินทางของสัญญาณ A(z,T) ในช่วงความยาวย่อย เมื่อให้ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นและผลของการกระจายตามความถี่ เป็นอิสระต่อกัน.....	11
รูปที่ 2.9 จะแสดงตัวอย่างของเส้นทางการคำนวณในกรณีที่แบ่งเส้นใยแสงออกเป็นช่วงสั้นๆ ความยาว δ จำนวน 4 ส่วน.....	11
รูปที่ 2.10 Positive frequency chirp ที่เกิดจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น.....	12
รูปที่ 2.11 Negative frequency chirp ที่เกิดจากผลของการกระจายตามความถี่.....	13
รูปที่ 2.12 Total Frequency Chirp เป็นศูนย์.....	13
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแสดงสเปกตรัมของ Raman Gain ใน silica fiber ที่ความยาวคลื่น Pump $\lambda_p = 1 \mu\text{m}$	16
รูปที่ 3.2 Raman Amplifier ชนิด Forward pumping.....	17
รูปที่ 3.3 Raman Amplifier ชนิด Backward pumping.....	17
รูปที่ 3.4 Raman Amplifier ชนิด Bidirectional pumping.....	17
รูปที่ 3.5 δS ที่ปลายทางของการขยายเปรียบเทียบกับค่า L_a / Z_0	18
รูปที่ 3.6 δS τ และ I_{pk} ของพัลส์ เทียบกับค่าที่ต้นทาง เมื่อ $Z_0 = 1 \text{ km}$ และ $L_a = 40 \text{ km}$ อยู่ในช่วง Adiabatic.....	19
รูปที่ 3.7 δS τ และ I_{pk} ของพัลส์ เทียบกับค่าที่ต้นทาง เมื่อ $Z_0 = 5 \text{ km}$ และ $L_a = 40 \text{ km}$ อยู่ในช่วง Resonance.....	20
รูปที่ 3.8 δS τ และ I_{pk} ของพัลส์ เทียบกับค่าที่ต้นทาง เมื่อ $Z_0 = 40 \text{ km}$ และ $L_a = 40 \text{ km}$ อยู่ในช่วง Non-Adiabatic.....	20
รูปที่ 4.1 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a / Z_0 = 0.5$	24

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รายการ	หน้า
รูปที่ 4.19 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการ ออกแบบโดยให้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการ ขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 8$	36
รูปที่ 4.20 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการ ออกแบบโดยให้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการ ขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 40$	37
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงค่า Q-factor ของการออกแบบโดยให้ s ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาด ใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$	41
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ s ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาด ใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$	41
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาด ใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$	42
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาด ใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$	42
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ ΔS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทาง ในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$	43
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ ΔS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทาง ในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$	43
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้การเปลี่ยนแปลง พลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบ ตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$	44
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้การเปลี่ยนแปลง พลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบ ตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$	44
รูปที่ 5.9 ค่า BER ของสัญญาณโซลิตอนความเร็ว 10 Gbps โดยมี Duty cycle = 30% มีคาบการขยาย สัญญาณเท่ากับ 50 km และ $L/Z_0 = 0.15$	46
รูปที่ 5.10 ค่า BER ของสัญญาณโซลิตอนความเร็ว 20 Gbps โดยมี Duty cycle = 20% มีคาบการขยาย สัญญาณเท่ากับ 40 km และ $L/Z_0 = 1$	47

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รายการ

หน้า

รูปที่ 5.11 ค่า BER ของสัญญาณซีดีทีอนความเร็ว 40 Gbps โดยมี Duty cycle = 20% มีคาบการขยายสัญญาณเท่ากับ 20 km และ $L/Z_0 = 2$47



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์

ASE – Amplified Spontaneous Emission Noise

BER – Bit-Error Rate

BPF – Band-Pass Filter

DSF – Dispersion-Shifted Fiber

EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier

FFT – Fast Fourier Transform

FWHM – Full-Width-Half-Maximum

Gbit/s – Giga-Bit per Second

GHz – Giga-Hertz

GVD – Group-Velocity Dispersion

$i = \sqrt{-1}$

km – Kilometer

LPF – Low-Pass Filter

mW – Milli-Watt

NLSE - Nonlinear Schrodinger Equation

OBPF – Optical Band-Pass Filter

OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio

ps – Pico-Second

RZ – Return-to-Zero

SMF – Standard Single-Mode Fiber

SNR – Signal-to-Noise Ratio

SOD – Second-Order Dispersion

SPM – Self Phase Modulation

SSFM – Split-Step Fourier Method

TOD – Third-Order Dispersion

Tb/s – Tera-Bit per Second

W - Watt

บทที่ 1

บทนำ

1. ภาพรวมของงานวิจัย

ปัจจุบันระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงได้มีบทบาทหลักในการเป็นระบบหลักเชื่อมโยงการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงระยะทางไกลระหว่างประเทศ หรือแม้แต่ทำหน้าที่เป็นระบบหลักรองรับการสื่อสารข้อมูลทั้งหมดของเมืองใหญ่ ในทางทฤษฎีเส้นใยแสงชนิดโหมดเดี่ยวขนาดเท่าเส้นผมมนุษย์เพียงเส้นเดียวนั้น สามารถรองรับการส่งข้อมูลดิจิทัลได้มากถึง 10^{15} bit/s ซึ่งอาจเทียบได้ว่ามากกว่าปริมาณข้อมูลที่เดินทางอยู่ในโลกปัจจุบัน แต่ในทางปฏิบัติจริงนั้น เมื่อสัญญาณพัลส์ซึ่งแทนที่ข้อมูลดิจิทัลเดินทางผ่านเส้นใยแสง จะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆขึ้นมากมาย ซึ่งทำให้สัญญาณพัลส์นั้นมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป ปรากฏการณ์หลักสองปรากฏการณ์ซึ่งจำกัดความสามารถของระบบอย่างมีนัยสำคัญนั้น คือ ปรากฏการณ์ Group Velocity Dispersion (GVD) หรือ Dispersion [1] ซึ่งส่งผลทำให้พัลส์ของสัญญาณเกิดการขยายตัวกว้างขึ้นจนไปเกินในช่องเวลาของพัลส์ที่อยู่ติดกัน ทำให้เกิดการตัดสินใจว่าเป็นบิต 1 หรือ บิต 0 ผิดพลาด ปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น ที่รู้จักกันในนามของ Kerr effect [1] ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ Self-Phase Modulation (SPM) [1] ในกรณีการส่งข้อมูลโดยใช้คลื่นพาหุความยาวคลื่นเดียว SPM นั้นมีผลกระทบให้สเปกตรัมของสัญญาณแสงที่ส่งไปเกิดการขยายตัวและผิดเพี้ยน วิธีหนึ่งซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาลักษณะ 2 ปัญหานี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ การสร้างสัญญาณที่เรียกว่าโซลิตอนแสง [1] เพื่อให้เดินทางไปในเส้นใยแสงแทนสัญญาณแสงธรรมดา โซลิตอนแสงนั้นสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยทำการปรับสมดุลระหว่างปรากฏการณ์ SPM และ GVD เป็นผลทำให้โซลิตอนพัลส์สามารถเดินทางในเส้นใยแสงโดยไม่เกิดความผิดเพี้ยนจาก GVD และ SPM เมื่อเส้นใยแสงนั้นไม่มีอัตราการสูญเสียพลังงาน

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพัลส์โซลิตอนแสงเดินทางในเส้นใยแสงในความเป็นจริงซึ่งมีอัตราการสูญเสียพลังงานนั้น จะเกิดการสูญเสียความสมดุลระหว่างปรากฏการณ์ SPM และ GVD เป็นผลทำให้โซลิตอนพัลส์ขยายตัวออกเพราะ GVD มีผลเหนือ SPM ดังนั้น การชดเชยการสูญเสียกำลังของสัญญาณโซลิตอนจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง การคิดค้นอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงที่รู้จักกันในนามของ Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) [1] สามารถสร้างความเป็นไปได้ในการขยายสัญญาณแสงได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อน EDFA จึงเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการชดเชยกำลังของสัญญาณโซลิตอน แต่จากรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัด เนื่องจากระยะห่างระหว่างช่วงการขยาย (L_a) ของ EDFA จำเป็นต้องมีค่าน้อยกว่าคาบโซลิตอน (Z_0) เพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณโซลิตอน [2] ข้อจำกัดนี้ก่อให้เกิดปัญหาในเชิงปฏิบัติอย่างยิ่ง เนื่องจากในกรณีที่อัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้น Z_0 จะมีค่าน้อยมาก จนถึงระดับไม่ถึง 10 กิโลเมตร เป็นผลให้ระยะห่างระหว่าง EDFA หรือ Amplifier span มีค่าน้อยตามไปด้วย ดังนั้นระบบจึงจำเป็นต้องใช้ EDFA จำนวนมากในการขยายสัญญาณ ทำให้จำนวนเงินที่ต้องลงทุนกับระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ทางเลือกที่น่าสนใจในการขยายสัญญาณโซลิตอน คือการใช้เทคนิค Distributed Raman Amplification (DRA) [1], [3] บนเส้นใยแสงที่ใช้เป็นตัวกลางในการเดินทาง เทคนิค DRA ทำได้โดยใส่แสงความถี่หนึ่งซึ่งมีพลังงานสูงที่เหมาะสม เข้าไปในเส้นใยแสง พร้อมกับกับสัญญาณขณะเดินทาง ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายสัญญาณโดยการถ่ายเทพลังงานจากแสงความถี่สูงผ่านปรากฏการณ์ Stimulated Raman scattering (SRS) [1]

การนำเทคนิค DRA มาใช้ในการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนนั้น ได้ถูกศึกษาครั้งแรกโดย Hasagawa [4] และต่อจากนั้นได้ถูกนำมาศึกษาอย่างละเอียดโดย Mollenauer [5] อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิค DRA ขยายสัญญาณโซลิตอนนั้นได้ถูกแทนที่โดยการคิดค้นอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง EDFA ในช่วงทศวรรษ 1990 เนื่องจากไม่สามารถสร้าง Pump laser กำลังงานสูงเพียงพอต่อการสร้างปรากฏการณ์ Raman เพื่อขยายสัญญาณได้

แต่ในสถานการณ์ปัจจุบัน การสร้าง Pump laser กำลังงานสูงนั้น ไม่ใช่เรื่องยากอีกต่อไป ดังนั้นในช่วงปี 2000 การศึกษาเทคนิค DRA เพื่อนำมาขยายสัญญาณแสงได้ถูกนำมาศึกษาอย่างกว้างขวาง แม้กระทั่งถูกนำมาทดลองจริงในระบบ โดยเฉพาะระบบระยะไกลยิ่ง การที่เทคนิค DRA กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้ง เนื่องจากเหตุผลที่ว่า DRA ให้สัญญาณรบกวนที่น้อยกว่า EDFA อย่างมาก DRA สามารถขยายแบนด์วิดท์ที่ใช้ขยายสัญญาณได้ไม่จำกัดโดยใช้ Pump laser ซึ่งมีความยาวคลื่นต่างกันหลายตัว ในขณะที่ EDFA มีแบนด์วิดท์จำกัดเพียงแค่ประมาณ 40 nm เท่านั้น

Mollenauer [5] ได้จำแนกลักษณะของการขยายสัญญาณโซลิตอนด้วย DRA ออกเป็น 3 เขตของอัตราส่วนระหว่าง L_s และ Z_0 โดยเมื่อ $L_s \gg 8Z_0$ โซลิตอนพัลส์จะรักษารูปร่างความเป็นโซลิตอนตลอดการเดินทางในเส้นใยแสง เขตนี้จึงถูกเรียกว่า Adiabatic region เขต $L_s = 8Z_0$ ซึ่งถูกเรียกว่า เขต resonance เนื่องจากทั้ง Pulse area ความกว้างของโซลิตอนพัลส์ และกำลังของโซลิตอนเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงที่สุดขณะทำการขยาย และเขต $L_s \ll 8Z_0$ ซึ่งถูกเรียกว่า เขต Non-adiabatic region เนื่องจากโซลิตอนเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยไม่รักษาค่าความเป็นโซลิตอนขณะถูกขยาย แต่อย่างไรก็ตาม พัลส์ในเขตนี้ สามารถกลับคืนเป็นโซลิตอนได้ที่ปลายเส้นใยแสงทราบได้ที่อัตราส่วนระหว่าง L_s และ Z_0 นั้นยังคงน้อยมากๆ เขตนี้คือลักษณะการขยายสัญญาณโซลิตอนโดย EDFA นั่นเอง

อย่างไรก็ตาม งานวิจัย [4] และ [5] ยังไม่ได้คิดถึงการสูญเสียกำลังงานของ Pump laser ที่ถ่ายเทให้กับสัญญาณโซลิตอน นอกจากนี้ยังทำการสมมติให้กำลังของโซลิตอนมีค่าคงที่ตลอดการเดินทาง การสมมติดังกล่าวนี้ค่อนข้างต่างจากความเป็นจริงอย่างชัดเจน เพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่ถูกต้อง ควรจะใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขยายสัญญาณโดยการแก้สมการเกี่ยวเนื่อง 4 สมการของ DRA [6] โดยวิธี Runge-Kutta อันดับ 4 (RK4) [7] ซึ่งวิธีนี้จะสามารถคิดผลของการเปลี่ยนแปลงของทั้ง Pump laser สัญญาณโซลิตอน และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ยิ่งกว่านั้น งานวิจัย [4] และ [5] ยังทำการออกแบบ DRA ให้เพียงแค่ชดเชยกำลังงานที่สูญเสียไปในเส้นใยแสงเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วยังมีการออกแบบ DRA เพื่อให้ได้อัตราขยายแบบอื่นที่น่าสนใจ และอาจให้ผลดีแก่การขยายสัญญาณโซลิตอนมากกว่างานวิจัย [4] และ [5]

2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาการขยายสัญญาณโซลิตอนแสงโดยวิธีที่ให้ผลที่ถูกต้องมากกว่าเดิม โดยจะทำจำลองทางคณิตศาสตร์ของการขยายสัญญาณโซลิตอนแสงด้วย DRA โดยใช้วิธี RK4 และใช้การจำลองนี้เพื่อออกแบบการขยายสัญญาณด้วยเทคนิค DRA ในรูปแบบต่างๆ โดยพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของโซลิตอน ได้แก่ Pulse area (s) พลังงาน ความกว้างพัลส์ (τ) และ Peak power (I_{pk}) ของสัญญาณ ศึกษาผลที่ได้เมื่อนำมาใช้ในการส่งสัญญาณโซลิตอน ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งทดสอบระบบการส่งสัญญาณดังกล่าวโดยใช้ค่า Q-factor เป็นตัววัดผล เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับกรณีการใช้ EDFA และการส่งสัญญาณโซลิตอนแสงในอุดมคติ

วิธี RK4 นั้นเป็นวิธีเชิงเลขที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อใช้แก้ระบบสมการอนุพันธ์เชิงเส้น เนื่องจากวิธีนี้มีความซับซ้อนน้อย ง่ายต่อการทำเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแม้จะใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก จึงถูกนำมาใช้ในการแก้ระบบสมการของ DRA ในงานวิจัยต่างๆโดยทั่วไป เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ โครงการวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี RK4 นี้ในการแก้ระบบสมการของ DRA

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนาต่อจากผลงานวิจัย [4] และ [5] ซึ่งเป็นผลงานที่ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1984 และ 1986 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าผลงาน [4] และ [5] จะมีความเก่าแก่กว่า 20 ปี แต่หลังจากผลงานดังกล่าวแล้วมิได้มีงานวิจัยใดสนใจนำเทคนิค DRA มาใช้ในการขยายสัญญาณโซลิตอนอีกเลย เนื่องจากเทคโนโลยีการขยายสัญญาณทางแสงนั้นถูกโอนถ่ายความสนใจไปยังการขยายสัญญาณโดยใช้อุปกรณ์ EDFA ตลอดช่วงระยะเวลาเกือบ 20 ปีที่ผ่านมา การใช้ EDFA ขยายสัญญาณโซลิตอนนั้นไม่สามารถทำให้สัญญาณโซลิตอนเข้าใกล้ความเป็นอุดมคติเนื่องจากกำลังสัญญาณของโซลิตอนจะเปลี่ยนแปลงเป็นรายคาบตลอดการเดินทาง อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาไม่เกิน 5 ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีการขยายสัญญาณโดยวิธี DRA นั้นกลับมามีความสนใจอีกครั้งเนื่องจากเราสามารถสร้างเลเซอร์กำลังสูงซึ่งสามารถ Pump ให้เกิดอัตราขยาย Raman ได้ตามต้องการ

3. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับเส้นใยแสง
- 2) ศึกษาทฤษฎีและบทความอ้างอิงที่เกี่ยวกับสื่อสัญญาณโซลิตอน
- 3) ศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++
- 4) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสง ที่มีผลต่อลักษณะของสัญญาณจากโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสง
- 5) เขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการส่งสัญญาณโซลิตอน โดยใช้เทคนิค DRA ในการขยายสัญญาณในรูปแบบต่างๆกัน คือ
 - ออกแบบให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย
 - ออกแบบให้พลังงานของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย
 - ออกแบบให้ I_{pk} ของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย

- ออกแบบให้ δS ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย
 - ออกแบบให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย
 - ออกแบบให้การเปลี่ยนแปลง I_{pk} ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบ ตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย
- 6) เปรียบเทียบการขยายสัญญาณโซลิตอน ด้วยเทคนิค DRA ทั้ง 6 รูปแบบ ดังกล่าวข้างต้น ที่อัตราส่วนระหว่าง L_a / Z_0 ค่าต่างๆ
 - 7) วัดประสิทธิภาพการส่งสัญญาณโซลิตอนจำนวน 128 บิต ที่ใช้เทคนิค DRA ในการขยายสัญญาณ โดยใช้ค่า Q-factor เป็นเกณฑ์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับระบบส่งสัญญาณที่ใช้ EDFA ในการขยายสัญญาณ และการส่งสัญญาณโซลิตอนแสงในอุดมคติ
 - 8) วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการส่งสัญญาณแบบต่างๆ
 - 9) เรียบเรียงรายงานฉบับสมบูรณ์ นำเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ และเรียบเรียงผลงานวิจัยเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

4. ส่วนประกอบของรายงาน

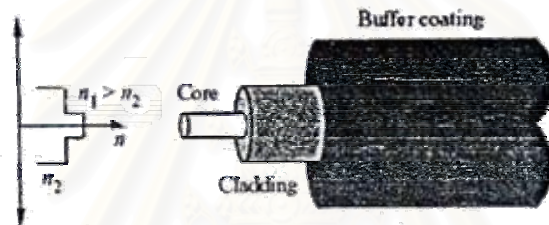
รายงานนี้ประกอบด้วยเนื้อหาโดยรวมนดังต่อไปนี้ ในบทต่อไปซึ่งเป็นบทที่ 2 จะปูพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีเกี่ยวกับการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงรวมถึงการกำเนิดโซลิตอนแสงและข้อจำกัด บทที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการขยายสัญญาณโซลิตอนโดยวิธี Lump amplification และวิธีการใช้ DRA รวมถึงทฤษฎีการขยายสัญญาณโซลิตอนโดย DRA จากบทความวิจัยที่ได้ถูกนำเสนอก่อนหน้านี้ บทที่ 4 แสดงผลการออกแบบ DRA โดยการใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยนี้ ซึ่งผลได้แสดงแง่มุมที่แตกต่างจากทฤษฎีที่แล้วมาอย่างมีนัยสำคัญ บทที่ 5 นำเสนอผลการจำลองสัญญาณโซลิตอนเดินทางในระบบเส้นใยแสงและผลของการวัดคุณภาพสัญญาณโดยใช้ค่า Q factor และค่า Bit-error rate ซึ่งผลการจำลองมีความสอดคล้องกับสิ่งที่ได้ค้นพบในบทที่ 4 อย่างยิ่ง และสุดท้ายบทที่ 6 จะเป็นการสรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

การเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสง

และการกำเนิดโซลิตอน

เส้นใยแสงนั้นทำจากซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีความบริสุทธิ์สูง มีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนแกน (Core) ซึ่งมีดัชนีหักเห n_1 และ ส่วนห่อหุ้ม (Cladding) ซึ่งมีดัชนีหักเห n_2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า n_1 ประมาณ 1% ดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้วส่วนแกนจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 ถึง 50 μm ขึ้นกับโหมดของการเดินทาง ขณะที่พัลส์ของสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณเนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใยแสงได้แก่



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเส้นใยแสงชนิด step-index

2.1 การสูญเสียกำลังงานของสัญญาณ (Fiber loss)

เมื่อสัญญาณเดินทางในเส้นใยแสงจะเกิดการลดทอนของสัญญาณเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

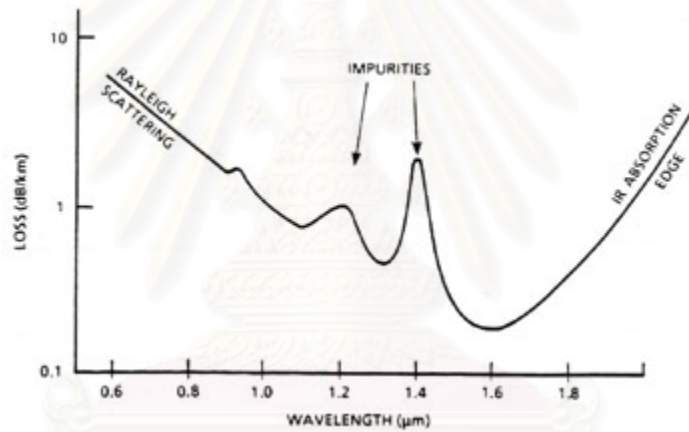
$$P_T = P_0 e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

โดย P_T คือ ค่ากำลังสัญญาณที่จุดเริ่มต้น P_0 คือ กำลังของสัญญาณที่ระยะ L และ α คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย

และจากคุณลักษณะของการสูญเสียดังรูปที่ 2.3 จะพบว่า การสูญเสียนั้นจะขึ้นกับความยาวคลื่นของสัญญาณที่ใช้ด้วย โดยจะมีค่าต่ำที่สุดประมาณ 0.2 dB/km ที่ความยาวคลื่นพาห์ 1.55 μm



รูปที่ 2.2. การเดินทางของพัลส์ในเส้นใยแสงเมื่อได้รับผลกระทบของการสูญเสีย



รูปที่ 2.3 คุณสมบัติของการสูญเสียในเส้นใยแสงชนิด single mode

2.2 Chromatic Dispersion

เมื่อพัลส์สัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะเกิดการขยายตัวของสัญญาณเนื่องจากการประวิงเวลาขององค์ประกอบแต่ละความถี่ ผลกระทบนี้เรียกว่า การกระจายตามความถี่ทางสี (Chromatic dispersion)

จากการกระจายค่าคงที่การแผ่ของคลื่น $\beta(\omega)$ รอบความถี่คลื่นพาห้ (ω_0) จะได้ว่า

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2.2)$$

โดย

$$\beta_m = \left[\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right]_{\omega=\omega_0} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

ซึ่ง β_1 จะหมายถึงส่วนกลับของความเร็วกลุ่มและเรียกว่า first-order group-velocity dispersion (GVD) ในขณะที่ β_2 หรือค่าคงที่การกระจายตามความถี่อันดับสอง (second-order dispersion) จะส่งผล

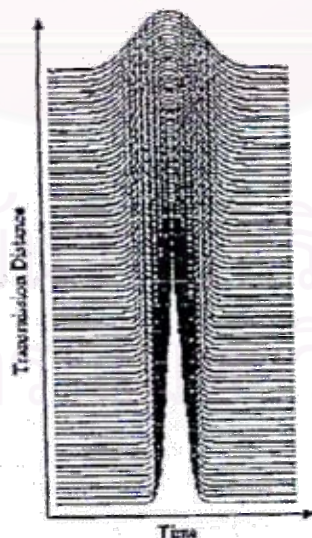
ต่อการขยายตัวของพัลส์โดยไม่ทำให้สเปกตรัมของพัลส์เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.4 และจะมีพารามิเตอร์อีกตัวซึ่งจะใช้กันอย่างแพร่หลายแทนที่ β_2 นั่นคือพารามิเตอร์ D ด้วยความสัมพันธ์

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.3)$$

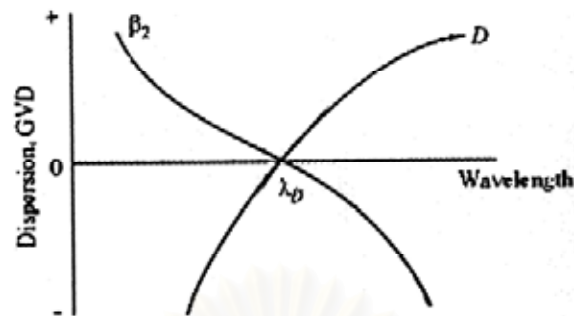
สำหรับ β_3 หรือค่าคงที่การกระจายตามความถี่อันดับสาม (third-order dispersion parameter, TOD) จะส่งผลต่อการแตกตัวและการบิดเบี้ยวของพัลส์ดังรูปที่ 2.5 จะสังเกตได้ว่ามีความยาวคลื่น λ_D ที่มีค่า β_2 หรือ D เป็นศูนย์ เรียกความยาวคลื่น λ_D นี้เรียกว่า zero-dispersion wavelength (ZDWL) อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ dispersion ไม่ได้หายไปในการส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ_D นี้เนื่องจากการส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นใกล้กับ λ_D นี้จะมีผลของ TOD รวมอยู่ด้วยและจะแสดงผลชัดเจนมากขึ้นสำหรับพัลส์ที่แคบมากๆ โดยทั่วไปแล้ว ค่า λ_D ของเส้นใยแสงชนิด single mode (SMF) จะมีค่าประมาณ $1.3 \mu\text{m}$ และมีค่าประมาณ $1.55 \mu\text{m}$ ในเส้นใยแสงชนิด dispersion-shift fiber (DSF) ระยะที่ผลของการกระจายตามความถี่อันดับสูงนี้มีนัยสำคัญ (TOD length) นี้มีค่าตามสมการ (2.4)

$$L_{TOD} = \frac{T_0^3}{|\beta_3|} \quad (2.4)$$

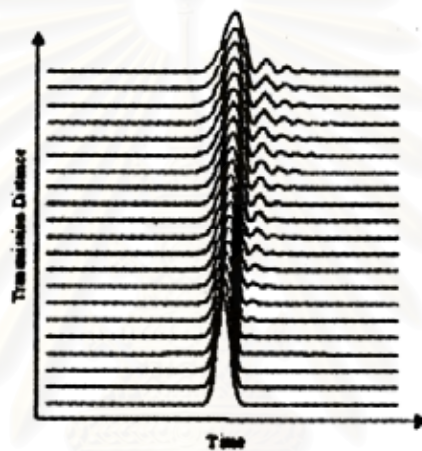
โดย L_{TOD} คือ TOD length และ T_0 คือ ความกว้างของพัลส์



รูปที่ 2.4 การเดินทางของพัลส์ในเส้นใยแสงเมื่อได้รับผลกระทบของ β_2



รูปที่ 2.5 คุณลักษณะของ β_2 ในเส้นใยแสงชนิด single mode



รูปที่ 2.6 การเดินทางของพัลส์ในเส้นใยแสงเมื่อได้รับผลกระทบของ TOD

2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity)

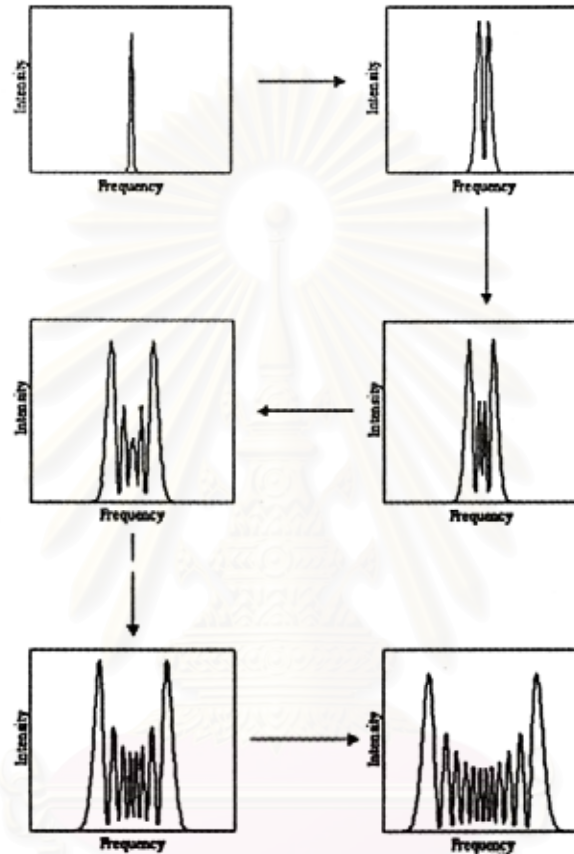
ปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสงนั้นเกิดจากการที่ดัชนีหักเหของเส้นใยแสงมีค่าแปรตามค่ากำลังของสัญญาณที่ใส่เข้าไป ซึ่งผลของความไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะส่งผลปรากฏการณ์ต่างๆ ได้แก่ Self Phase Modulation (SPM) และ Four Wave Mixing (FWM)

SPM นั้นจะมีผลทำให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกโดยรูปร่างของพัลส์ไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่เดียวกัน FWM เป็นปรากฏการณ์ที่กำลังงานของพัลส์สัญญาณที่ความถี่หนึ่งได้ถ่ายเทไปยัง sideband ที่ความถี่ต่างกัน โดยในทางปฏิบัติแล้ว แม้มีเพียงพัลส์สัญญาณความถี่เดียว ปรากฏการณ์ก็สามารถเกิดขึ้น โดยสัญญาณจะถ่ายเทกำลังงานไปสัญญาณรอบกวน จนกำลังงานจะค่อยๆ ลดลง มีผลให้สเปกตรัมขยายตัวอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.7

ซึ่งระยะที่ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นนี้มีนัยสำคัญ (Nonlinearity length) มีค่าตามสมการ

$$L_{nl} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (2.5)$$

โดย L_{nl} คือ Nonlinearity length, γ คือ สัมประสิทธิ์ของความไม่เป็นเชิงเส้น และ P_0 คือ ค่ากำลังของสัญญาณ



รูปที่ 2.7 การขยายตัวของสเปกตรัมเนื่องจาก SPM ในเส้นใยแสง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการคำนวณการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสง

การเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงจะถูกกำหนดโดยสมการ Nonlinear Schrödinger Equation

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = -\frac{1}{2}\alpha A - i\frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i\gamma|A|^2 A \quad (2.6)$$

โดย A คือ สัญญาณ α คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย β_2 และ β_3 คือ ค่าคงที่การกระจายออกตามความถี่อันดับสองและสามตามลำดับ และ γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ความไม่เป็นเชิงเส้น

ในการศึกษาถึงการเดินทางของพัลส์สัญญาณในเส้นใยแสงนั้นจะต้องหาผลเฉลยของสมการ (2.6) ซึ่งไม่มีผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytic solutions) ยกเว้นบางกรณีเช่น กรณีของการใช้โซลิตอนแสง ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งในโครงการนี้จะใช้ระเบียบวิธีที่เรียกว่า split-step Fourier method โดยระเบียบวิธีนี้จะแบ่งเส้นใยแสงออกเป็นช่วงสั้นๆ ในช่วงสั้นๆ นี้จะถือว่า มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นหรือผลของการกระจายตามความถี่เพียงอย่างเดียว ดังนั้น จากการใช้ขั้นตอนการวนซ้ำและการแปลงฟูเรียร์จึงสามารถคำนวณหาผลเฉลยของสมการ (2.6) ได้โดยการแบ่งสมการ (2.6) เป็น 2 ส่วนคือ

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (2.7)$$

โดย \hat{D} คือ ตัวดำเนินการอนุพันธ์ และ \hat{N} คือ ตัวดำเนินการความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งนิยามไว้ดังนี้

$$\hat{D} = -\frac{1}{2}\alpha - i\frac{1}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial t^3} \quad (2.8)$$

$$\text{และ } \hat{N} = i\gamma|A|^2 \quad (2.9)$$

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ระเบียบวิธี Split-step Fourier method นี้ จะแบ่งเส้นใยแสงเป็นช่วงสั้นๆ มีความยาว δ โดยในการคำนวณหาผลเฉลยจาก z ไปยัง $z+\delta$ นี้จะแบ่งอีกเป็น 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.8 ในขั้นตอนแรกนี้จะคำนวณโดยถือว่า มีเพียงผลของ ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวหรือ $\hat{D} = 0$ และในอีกขั้นตอนนั้นจะถือว่า มี ผลของ การกระจายตามความถี่เพียงอย่างเดียว หรือ $\hat{N} = 0$ นั่นคือ จะได้ผลเฉลยดังสมการ (2.10)

$$A(z + \delta, T) \cong e^{\delta\hat{D}} e^{\delta\hat{N}} A(z, T) \quad (2.10)$$

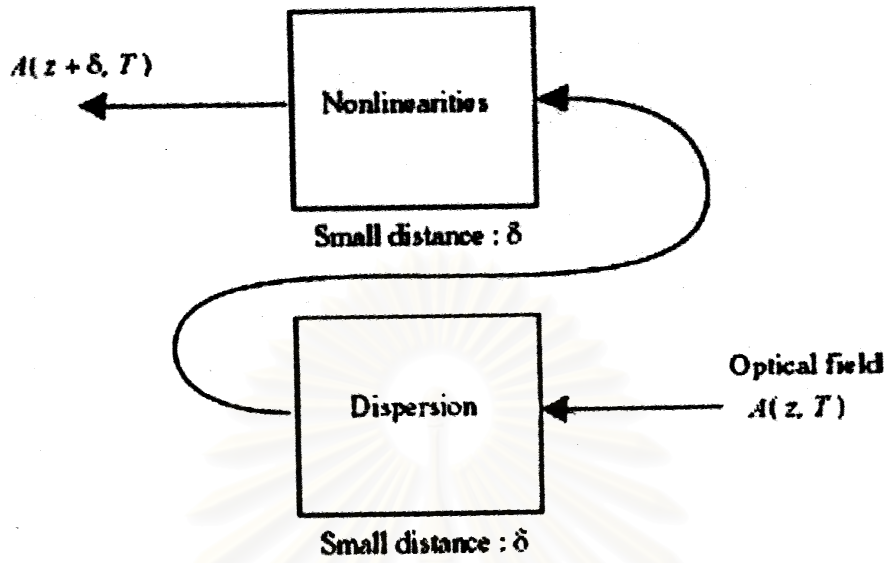
ด้วยการใช้ตัวดำเนินการอนุพันธ์ \hat{D} ในโดเมนของฟูเรียร์ ซึ่งจะแทน $\frac{\partial}{\partial T}$ ด้วย $i\omega$ จะได้

$$F\{D\} = -\frac{1}{2}\alpha + i\frac{1}{2}\beta_2\omega^2 - i\frac{1}{6}\beta_3\omega^3 \quad (2.11)$$

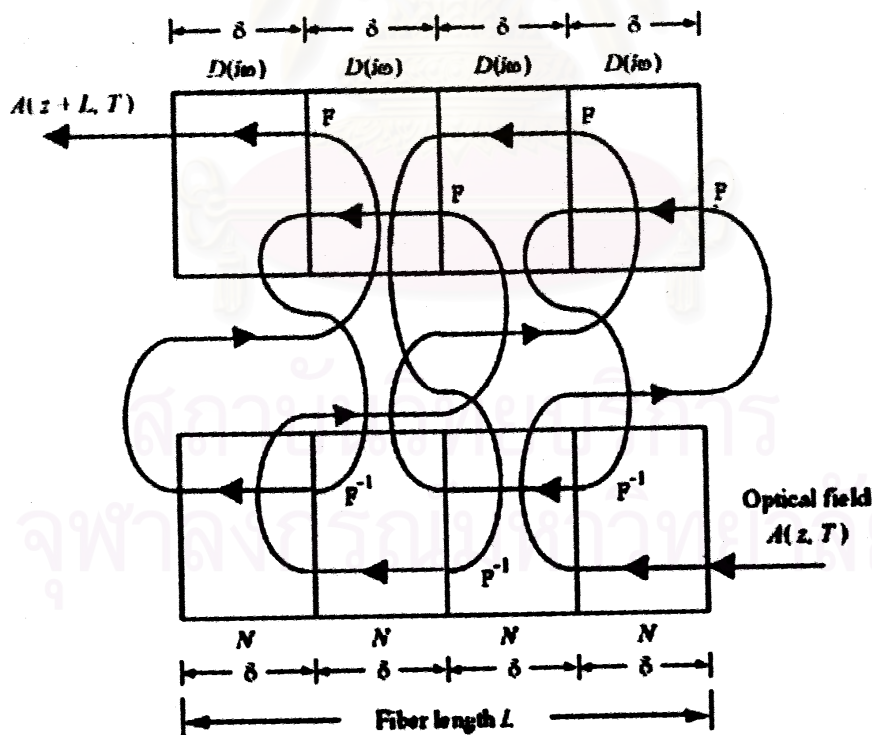
นั่นคือ สามารถเขียนสมการ (2.10) ในรูปแบบใหม่ดังนี้

$$A(z + \delta, T) = \{F^{-1} e^{i\delta F\{D\}} F\} e^{\delta\hat{N}} A(z, T) \quad (2.12)$$

โดยตัวอย่างเส้นทางการคำนวณสามารถดูได้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 การเดินทางของสัญญาณ $A(z, T)$ ในช่วงความยาวย่อย δ เมื่อให้ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นและผลของการกระจายตามความถี่ เป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 2.9 จะแสดงตัวอย่างของเส้นทางการคำนวณในกรณี que แบ่งเส้นใยแสงออกเป็นช่วงสั้นๆ ความยาว δ จำนวน 4 ส่วน

2.5 การกำเนิดโซลิตอนในเส้นใยแสง

โซลิตอนแสงเป็นพัลส์พิเศษซึ่งสามารถเดินทางไปในเส้นใยแสงที่ไม่มีความสูญเสียเป็นระยะทางอนันต์โดยจะไม่ได้รับผลกระทบจากความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจาก Dispersion และ SPM เนื่องจากโซลิตอนสามารถทำให้เกิดขึ้นได้จากการอาศัยความสมดุลจากผลของ SPM และผลของ Dispersion นั้นเอง

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลของ SPM จะทำให้เกิด positive frequency chirp ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณกว้างออกไป วิธีโซลิตอนแสงจึงได้นำผลของการกระจายตามความถี่มาชดเชยผลของความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเลือกใช้ผลของการกระจายตามความถี่ที่เกิด negative frequency chirp เพื่อให้สมดุลกับผลของความไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องเลือกใช้ Anomalous Dispersion ($\beta_2 < 0$) ซึ่งให้ Frequency chirp เป็นแบบ negative ตามที่ต้องการดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นสำหรับโซลิตอนแสง ในทางทฤษฎี จะมี Frequency chirp รวมเป็นศูนย์ตลอดระยะทางที่โซลิตอนแสง เดินทางในเส้นใยแสง ดังรูปที่ 2.12

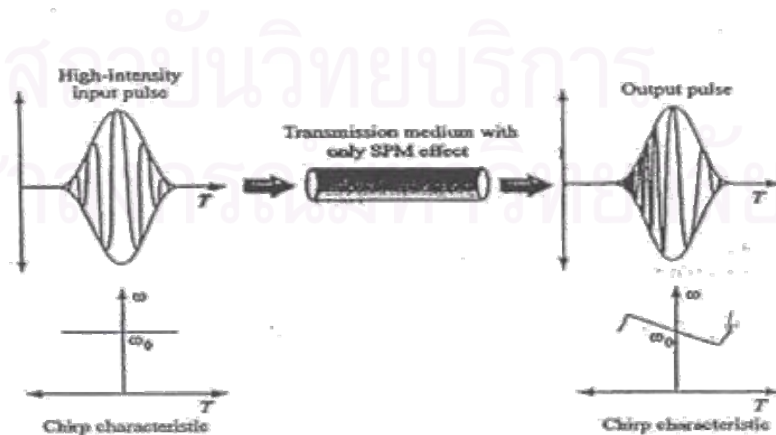
ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดโซลิตอนแสง คือ

- ความยาวคลื่นของคลื่นพาห้ต้องอยู่ในช่วงที่เป็น Anomalous Dispersion ($\beta_2 < 0$)
- กำลังงานของสัญญาณแสงที่ใช้ต้องมีค่าที่ตายตัวค่าหนึ่ง ซึ่งหาได้จากการกำหนดค่า N ในสมการ 2.13

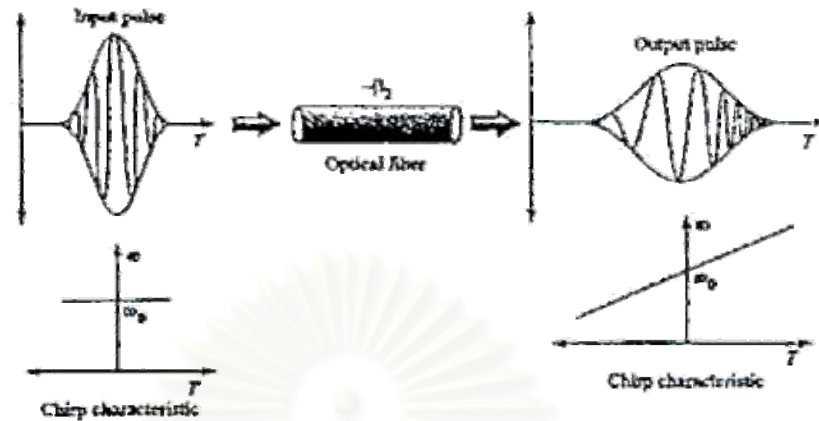
$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{T_0^2 \gamma P_0}{|\beta_2|} \tag{2.13}$$

ให้มีค่าเท่ากับ 1 (สำหรับ Fundamental Optical Soliton) ทำให้ได้ค่ากำลังงานที่ทำให้สัญญาณแสงเป็นโซลิตอนแสง ($P_{soliton}$) ดังนี้

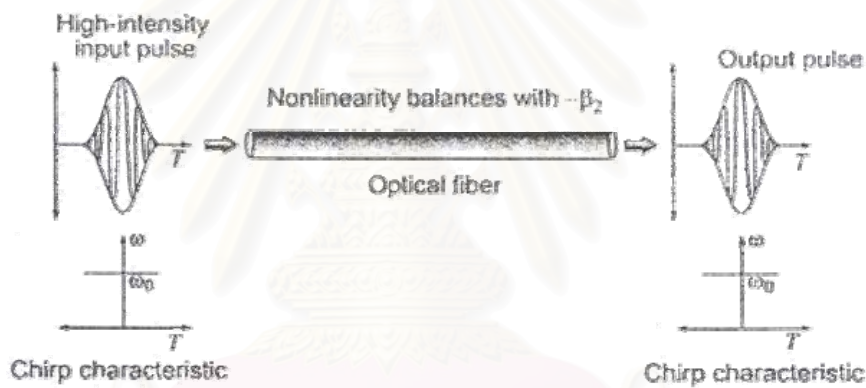
$$P_{soliton} = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_0^2} \tag{2.14}$$



รูปที่ 2.10 Positive frequency chirp ที่เกิดจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.11 Negative frequency chirp ที่เกิดจากผลของการกระจายตามความถี่



รูปที่ 2.12 Total Frequency Chirp เป็นศูนย์

2.6 ปัญหาที่สร้างความผิดเพี้ยนบนสัญญาณโซลิตอนแสง

1) Fiber loss

ในทางปฏิบัติ สัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น ทำให้กำลังของสัญญาณไม่คงที่ตลอดเส้นทาง ทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างผลของความไม่เป็นเชิงเส้นและผลของการกระจายตามความถี่

ในการสร้างแบบจำลองหรือในการออกแบบระบบการส่งข้อมูลจึงควรจะนำผลเนื่องจากการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นมาร่วมพิจารณาด้วย โดยเรียกว่า Average soliton ดังนั้นค่ากำลังงานที่ทำให้สัญญาณแสงเป็น Average soliton จึงต้องมีการชดเชยผลของกำลังที่สูญเสียไปในระยะทางที่แสงเดินทาง โดยรวมผลของการสูญเสียพลังงาน เข้าไปใน $P_{soliton}$ จึงได้ว่า กำลังงานที่ทำให้สัญญาณแสงเป็นโซลิตอนแสง โดยได้รับการชดเชยการสูญเสียพลังงานตามสมการ

$$P_{soliton,loss} = P_{soliton} \frac{\alpha L}{1 - \exp(-\alpha L)} \tag{2.15}$$

โดยที่ L เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง

2) Soliton Interaction

เป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อมีโซลิตอนพัลส์จำนวนมากว่าหนึ่งขึ้นไป โซลิตอนพัลส์ที่อยู่ติดกันจะถูกดึงเข้าหากันเป็นรายคาบ และจะชนกันเกิดเป็นโซลิตอนพัลส์เดี่ยว เนื่องจากโซลิตอนที่ติดกันถูกเปลี่ยนความเร็วกลุ่มผ่านปรากฏการณ์ SPM เป็นผลให้พัลส์สัญญาณผิดเพี้ยนไปจากเดิม วิธีลดผลของ Soliton interaction ทำได้โดยการเพิ่มระยะห่าง (Soliton separation) ระหว่างสองโซลิตอน ซึ่งมีผลให้อัตราส่งข้อมูลลดลงในทางกลับกัน

3) Gordon-Haus effect

คือปรากฏการณ์ที่สัญญาณโซลิตอนมีการเคลื่อนตัวอย่าง Random ออกจาก Time interval ของตัวเอง ดังนั้นเมื่อสัญญาณโซลิตอนบิตหนึ่งเคลื่อนไปทับบิตข้างๆจะทำให้การตัดสินใจผิดพลาดไป Gordon-Haus effect นั้นเกิดจากการที่สัญญาณรบกวนในระบบไปเปลี่ยนแปลงเฟสของโซลิตอน ซึ่งส่งผลต่อความเร็วกลุ่มของโซลิตอนแต่ละบิต ความรุนแรงของ Gordon-Haus effect ที่ระยะทางหนึ่งๆนั้น นอกจากจะขึ้นกับค่าความแรงของสัญญาณรบกวนแล้ว ยังขึ้นกับ Dispersion และค่าคาบของการขยายสัญญาณอีกด้วย

บทที่ 3

การขยายสัญญาณโซลิตอน

เมื่อสัญญาณเดินทางในเส้นใยแสง จะเกิดการสูญเสียกำลังของสัญญาณขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กันตามสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังนี้

$$P_T = P_0 e^{-\alpha L} \quad (3.1)$$

เมื่อ P_T คือกำลังของสัญญาณที่ระยะ L และ α คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียกำลังของสัญญาณในเส้นใยแสง ซึ่งในการส่งสัญญาณโซลิตอนก็เช่นเดียวกัน ย่อมเกิดการสูญเสียกำลังของสัญญาณขึ้น ทำให้ค่ากำลังที่ทำให้สัญญาณยังคงความเป็นโซลิตอนอยู่ได้เสียไป ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองหรือในการออกแบบระบบการส่งสัญญาณ ควรจะต้องนำผลการสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้มาพิจารณาด้วย

3.1 เทคนิคการชดเชยการสูญเสียกำลังของสัญญาณโซลิตอนด้วย EDFA

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่า การสร้างแบบจำลองหรือในการออกแบบระบบการส่งข้อมูลจะต้องนำผลเนื่องจากการสูญเสียกำลังของสัญญาณที่เกิดขึ้นมาร่วมพิจารณาด้วย ดังนั้นค่ากำลังของสัญญาณที่ต้นทางเมื่อใช้ EDFA ในการขยายสัญญาณ ที่ทำให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณในช่วงการขยายยังคง $P_{soliton}$ โดยรวมผลของการสูญเสียพลังงานแล้วจะมีค่าตามสมการคือ

$$P_{soliton,loss} = P_{soliton} \frac{\alpha L}{1 - \exp(-\alpha L)} \quad (3.2)$$

โดยที่ $P_{soliton,loss}$ คือกำลังของสัญญาณที่ต้นทางเมื่อรวมผลของการสูญเสียพลังงาน และทำให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณในช่วงการขยายยังคงเท่ากับ $P_{soliton}$ ซึ่งการขยายสัญญาณด้วย EDFA มีข้อจำกัดอย่างหนึ่งคือ ระยะห่างระหว่างช่วงของการขยายสัญญาณจะต้องมีค่าน้อยกว่า Z_0 ซึ่งถูกกำหนดด้วยสมการ คือ

$$Z_0 = \frac{\pi \tau_o^2}{2|\beta_2|} \quad (3.3)$$

Z_0 นั้นเป็นพารามิเตอร์ซึ่งได้จากการคำตอบของสมการ NLSE โดยแสดงค่าระยะทางบนเส้นใยแสงซึ่งไม่มีอัตราการสูญเสียที่เฟสของโซลิตอนเปลี่ยนแปลงครบ 2π พอดีจึงถูกเรียกกันโดยทั่วไปว่าคาบของโซลิตอน

3.2 เทคนิคการขยายสัญญาณแสงกำลังของสัญญาณด้วย DRA

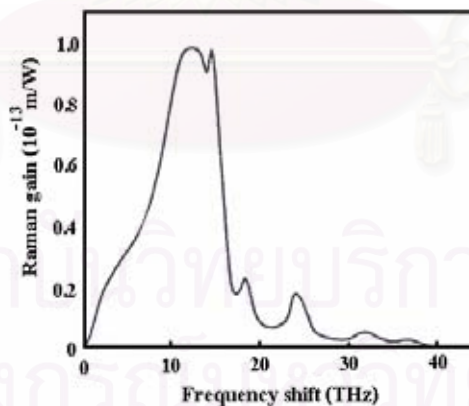
DRA เป็นเทคนิคการขยายสัญญาณแสงรูปแบบหนึ่ง กล่าวคือเมื่อใส่คลื่นแสงความถี่หนึ่งซึ่งเรียกว่า Pump เข้าไปภายในเส้นใยแสง จะทำให้เกิด Gain ขึ้นที่ความถี่ซึ่งต่ำกว่าความถี่ของ Pump ที่ใส่เข้าไปประมาณ 13 TH_z หรือสูงกว่าความยาวคลื่นของ Pump ที่ใส่เข้าไปประมาณ 100 nm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 Gain ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า Raman Gain นอกจากนี้ Raman Gain ยังมีคุณสมบัติเป็น Distributed Gain ซึ่งทำให้เราสามารถทำการออกแบบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในขณะที่เดินทางได้ ที่สถานะอยู่ตัวของ DRA สามารถแยกพิจารณาออกได้ตามสมการ ดังนี้

$$\frac{dP_f}{dz} = -\alpha_p P_f - \frac{f_p}{f_s} \frac{G_R}{K_{eff} A_{eff}} P_s P_f \quad (3.4)$$

$$\frac{dP_b}{dz} = \alpha_p P_b + \frac{f_p}{f_s} \frac{G_R}{K_{eff} A_{eff}} P_s P_b \quad (3.5)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + \frac{G_R}{K_{eff} A_{eff}} P_f P_s + \frac{G_R}{K_{eff} A_{eff}} P_b P_s \quad (3.6)$$

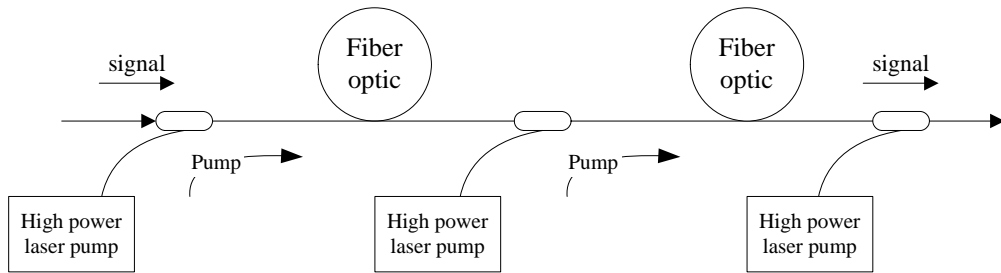
โดยที่ z คือ ระยะในการสื่อสารสัญญาณ P_s , P_f และ P_b คือ กำลังของสัญญาณ กำลังของ Forward pump และ Backward pump ตามลำดับ α_s และ α_p คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียกำลังของสัญญาณและของ Pump ในเส้นใยแสง เช่นเดียวกับกับ f_s และ f_p คือ ความถี่ของสัญญาณ และของ Pump G_R คือค่าสัมประสิทธิ์ของ Raman Gain K_{eff} คือ Polarization factor และ A_{eff} คือ พื้นที่ประสิทธิภาพผลของเส้นใยแสง



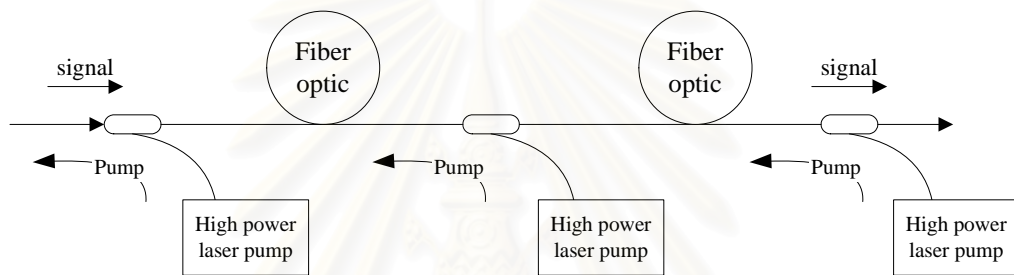
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแสดงสเปกตรัมของ Raman Gain ใน silica fiber ที่ความยาวคลื่น Pump $\lambda_p = 1 \mu\text{m}$

DRA สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ 3 วิธีได้แก่

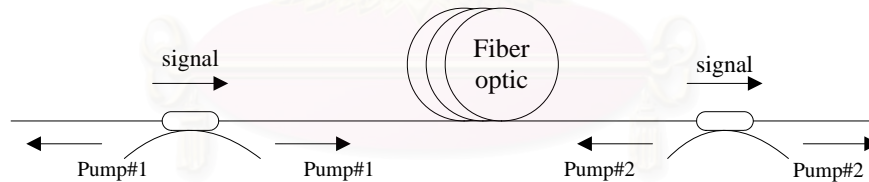
1. Forward pumping
2. Backward pumping
3. Bidirectional pumping



รูปที่ 3.2 Raman Amplifier ชนิด Forward pumping



รูปที่ 3.3 Raman Amplifier ชนิด Backward pumping



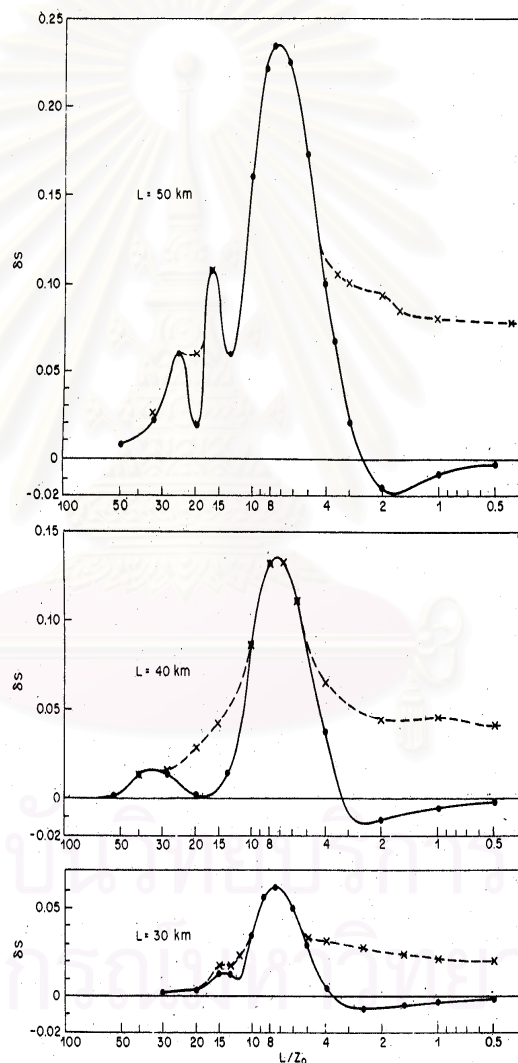
รูปที่ 3.4 Raman Amplifier ชนิด Bidirectional pumping

DRA ชนิด Forward pumping จะส่ง pump แสงไปในทิศทางเดียวกับสัญญาณเพื่อเพิ่มกำลังของสัญญาณที่ต้องการส่ง ส่วน DRA ชนิด Backward pumping นั้นส่ง pump ดังกล่าวสวนทางกับสัญญาณที่ต้องการส่ง และ DRA ชนิด Bidirectional pumping จะนำ pump ทั้งสองชนิดข้างต้นมาใช้ร่วมกัน

3.3 ทฤษฎีการขยายสัญญาณโซลิตอนในเส้นใยแสงด้วย DRA จากบทความอ้างอิง [4], [5]

จากการศึกษาบทความอ้างอิง ซึ่งทำการสร้างแบบจำลองการส่งสัญญาณโซลิตอนผ่านเส้นใยแสง โดยใช้เทคนิค DRA แบบ Bidirectional Pumping ในการขยายสัญญาณ ในการจำลองนี้ได้ออกแบบโดยให้อัตรา

การขยายสัญญาณของ Pump ที่เกิดขึ้น สามารถชดเชยการสูญเสียกำลังของสัญญาณในเส้นใยแสงได้พอดีที่ปลายทาง ทำการสมมุติว่ากำลังของ Pump ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ ไม่มีการสูญเสียไปในการขยายสัญญาณโซลิตอนและสัญญาณโซลิตอนมีกำลังคงที่ตลอดระยะทาง รูปที่ 3.5 เป็นผลของการจำลอง การส่งสัญญาณด้วยวิธีดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ Pulse area (δS) ของสัญญาณที่ปลายทาง เปรียบเทียบกับอัตราส่วนระหว่าง L_a และ Z_0 โดยที่ S หาได้จากการอินทิเกรตพรั่างพัลส์สัญญาณ ในกรณีของพัลส์สัญญาณโซลิตอนที่สมบูรณ์ที่ต้นทาง s จะมีค่าเท่ากับ π



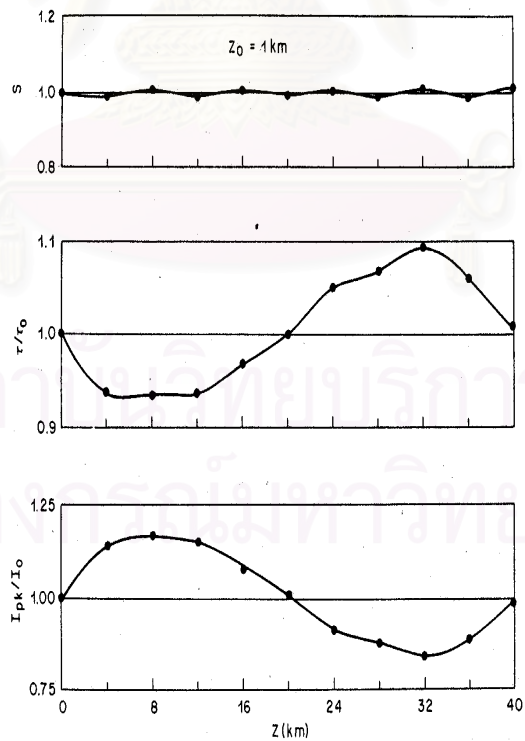
รูปที่ 3.5 δS ที่ปลายทางของการขยายเปรียบเทียบกับค่า L_a / Z_0

จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า L_a และ Z_0 มีผลอย่างมากต่อลักษณะของสัญญาณแสง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะอื่นๆของพัลส์สัญญาณ ที่เป็นผลจากการจำลองการส่งสัญญาณ ด้วยวิธีการข้างต้น ตลอดจนการเดินทางด้วยแล้ว ทางผู้วิจัยได้พิจารณา แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

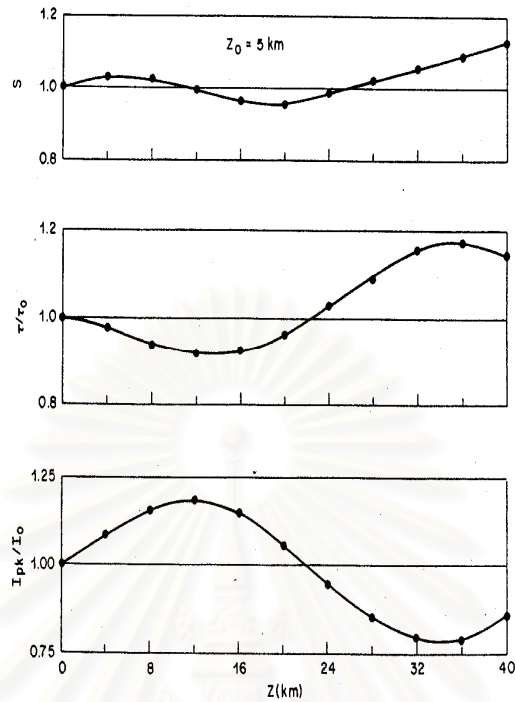
1) ช่วง Adiabatic เป็นช่วงที่ δS ของสัญญาณ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทาง ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณ $\pm 10\%$ ขณะที่ I_{pk} ของพัลส์มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 25\%$ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง τ และ I_{pk} ของพัลส์ จะเห็นว่ามีลักษณะสัมพันธ์กัน กล่าวคือ เมื่อส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในทางเพิ่มขึ้น อีกส่วนหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงในทางลดลง ลักษณะต่างๆที่กล่าวมาแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 เมื่อค่า $L_a / Z_0 > 8$

2) ช่วง Resonance เป็นช่วงที่ δS ของสัญญาณ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการเดินทาง โดยเฉพาะที่ปลายทางจะเห็นว่ามีความแตกต่างจากต้นทางอย่างเห็นได้ชัด ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณ $\pm 20\%$ ขณะที่ I_{pk} มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 25\%$ เมื่อพิจารณาเรื่องการเปลี่ยนแปลง τ และ I_{pk} ของพัลส์ จะเห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์กันเท่าใดนัก ลักษณะต่างๆที่กล่าวมาแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 เมื่อค่า $L_a / Z_0 \cong 8$

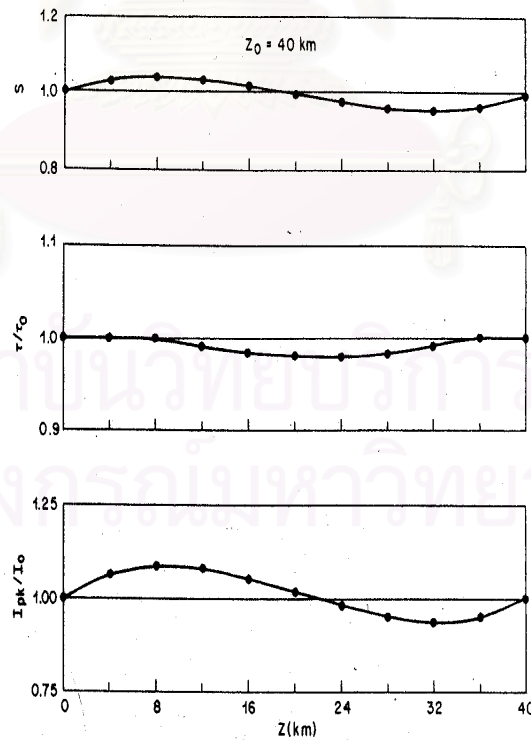
3) ช่วง Non-Adiabatic เป็นช่วงที่ δS τ และ I_{pk} ของพัลส์สัญญาณ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับต้นทาง คือประมาณไม่เกิน $\pm 10\%$ แต่เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลง τ และ I_{pk} ของพัลส์ จะเห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์กันเท่าใดนัก ลักษณะต่างๆที่กล่าวมาแสดงไว้ในรูปที่ 3.8 เมื่อค่า $L_a / Z_0 < 8$



รูปที่ 3.6 δS τ และ I_{pk} ของพัลส์ เทียบกับค่าที่ต้นทาง เมื่อ $Z_0 = 1$ km และ $L_a = 40$ km อยู่ในช่วง Adiabatic



รูปที่ 3.7 δS τ และ I_{pk} ของพัลส์ เทียบกับค่าที่ต้นทาง เมื่อ $Z_0 = 5$ km และ $L_a = 40$ km อยู่ในช่วง Resonance



รูปที่ 3.8 δS τ และ I_{pk} ของพัลส์ เทียบกับค่าที่ต้นทาง เมื่อ $Z_0 = 40$ km และ $L_a = 40$ km อยู่ในช่วง Non-Adiabatic

บทที่ 4

การออกแบบ DRA เพื่อขยายสัญญาณโซลิตอน

โดยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์

จากบทที่แล้ว เนื่องจากผู้วิจัยในบทความอ้างอิงที่ได้ทำการวิเคราะห์การขยายสัญญาณโซลิตอนด้วย DRA นั้น ไม่ได้ศึกษาผลของการออกแบบการขยายสัญญาณด้วยเทคนิค DRA รูปแบบอื่นๆ ที่น่าสนใจและเป็นไปได้ ที่อาจจะทำให้พัลส์โซลิตอนแสงมี ΔS น้อยกว่าที่ผู้วิจัยเสนอไว้ นอกจากนี้ผลการจำลองการส่งสัญญาณด้วยวิธีดังกล่าว ผู้วิจัยใช้การประมาณค่ากำลังของ Pump ไม่ได้ทำการคำนวณค่ากำลัง จากสมการ DRA โดยตรงด้วย

หลักการออกแบบระบบการส่งสัญญาณโซลิตอนในเส้นใยแสงในรายงานฉบับนี้ จะอ้างอิงจากบทความอ้างอิงดังกล่าว คือจะพิจารณาลักษณะต่างๆของโซลิตอนที่อัตราส่วน L_a / Z_0 ต่างๆกัน ออกแบบการขยายสัญญาณแสงที่ส่งผ่านเส้นใยแสง โดยใช้เทคนิค DRA ในรูปแบบต่างๆกัน พร้อมเปรียบเทียบการจำลองการส่งสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งโครงงานวิจัยนี้ จะทำการออกแบบการขยายสัญญาณโซลิตอนด้วยเทคนิค DRA ทั้งหมดประมาณ 6 รูปแบบ คือ

- รูปแบบที่ 1 ออกแบบให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย
- รูปแบบที่ 2 ออกแบบให้พลังงานของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย
- รูปแบบที่ 3 ออกแบบให้ I_{pk} ของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย
- รูปแบบที่ 4 ออกแบบให้ ΔS ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย
- รูปแบบที่ 5 ออกแบบให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย
- รูปแบบที่ 6 ออกแบบให้การเปลี่ยนแปลง I_{pk} ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบ ตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย

4.1 ผลการจำลองการออกแบบการขยายสัญญาณโซลิตอนแสงโดยใช้เทคนิค DRA ในรูปแบบต่างๆ

โครงงานนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์หลักของ Non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF:G.655 or G.655b) ที่ใช้ในการจำลองการส่งสัญญาณโซลิตอน คือ $\alpha = 0.2$ dB/km $\beta_2 = -1.2754$ ps²/km $\gamma = 2.6$ [Wkm]⁻¹ และ $L_a = 40$ km ส่วนค่า Bit rate $P_{soliton}$ P_f และ P_b ที่เหมาะสมของแต่ละรูปแบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.1 ค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย

L_a/Z_0	0.5	1	2	8	40
Bit rate [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
$P_{soliton}$ [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f (input) [mW]	62.00	57.00	81.00	55.00	55.00
P_f (output) [mW]	4.51	3.25	2.28	0.23	0.000014
P_b (input) [mW]	68.72	63.60	88.71	60.32	57.55
P_b (output) [mW]	5.00	3.63	2.5	0.25	0.000015

ตารางที่ 4.2 ค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย

L_a/Z_0	0.5	1	2	8	40
Bit rate [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
$P_{soliton}$ [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f (input) [mW]	75.00	56.00	51.00	72.00	349.00
P_f (output) [mW]	5.33	3.08	1.70	0.16	0.00000026
P_b (input) [mW]	56.23	85.26	111.07	210.60	611.56
P_b (output) [mW]	4.00	4.70	3.70	0.46	0.00000047

ตารางที่ 4.3 ค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้ I_{pk} ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย

L_a/Z_0	0.5	1	2	8	40
Bit rate [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
$P_{soliton}$ [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f (input) [mW]	75.00	56.00	51.00	72.00	349.00
P_f (output) [mW]	5.33	3.08	1.70	0.16	0.00000026
P_b (input) [mW]	56.23	85.26	111.07	210.60	611.56
P_b (output) [mW]	4.00	4.70	3.70	0.46	0.00000047

ตารางที่ 4.4 ค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้ δS ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย

L_a/Z_0	0.5	1	2	8	40
Bit rate [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
$P_{soliton}$ [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f (input) [mW]	65.00	72.60	88.00	73.00	70.00
P_f (output) [mW]	4.68	3.71	2.21	0.23	0.000013
P_b (input) [mW]	70.90	80.80	109.70	79.16	94.89
P_b (output) [mW]	5.10	4.14	2.76	0.25	0.000018

ตารางที่ 4.5 ค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย

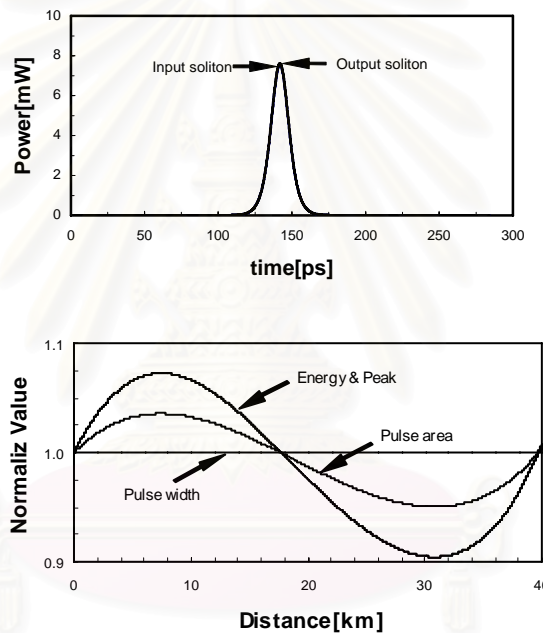
L_a/Z_0	0.5	1	2	8	40
Bit rate [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
$P_{soliton}$ [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f (input) [mW]	58.00	66.00	78.00	147.00	99.00
P_f (output) [mW]	4.19	3.45	2.12	0.11	0.000013
P_b (input) [mW]	82.98	88.31	110.00	264.86	36.79
P_b (output) [mW]	6.00	4.61	3.00	0.19	0.0000049

ตารางที่ 4.6 ค่าต่างๆของการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยออกแบบให้การเปลี่ยนแปลง I_{pk} ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบ ตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย

L_a/Z_0	0.5	1	2	8	40
Bit rate [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
$P_{soliton}$ [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f (input) [mW]	58.00	66.00	78.00	147.00	99.00
P_f (output) [mW]	4.19	3.45	2.12	0.11	0.000013
P_b (input) [mW]	82.98	88.31	110.00	264.86	36.79
P_b (output) [mW]	6.00	4.61	3.00	0.19	0.0000049

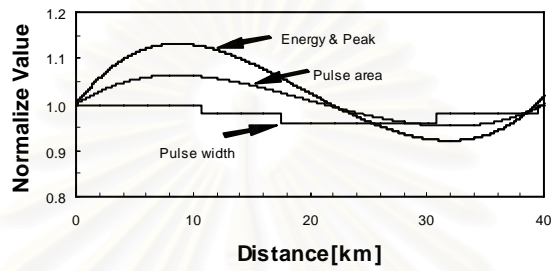
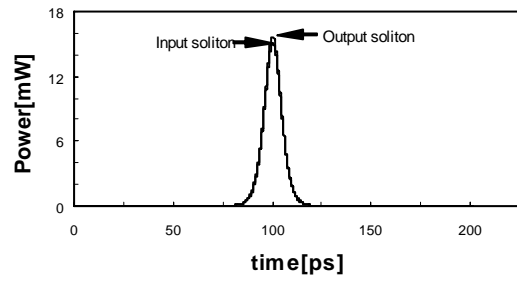
จากผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยการขยายสัญญาณด้วยเทคนิค DRA ทั้ง 6 รูปแบบดังกล่าว มีสิ่งที่น่าสนใจคือ ชุดค่าข้อมูลของการออกแบบโดยให้พลังงานของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย มีค่าเท่ากับ ชุดค่าข้อมูลของการออกแบบโดยให้ I_{pk} ของ

โซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย และ ชุดค่าข้อมูลของการออกแบบโดยให้พลังงานของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย มีค่าเท่ากับ ชุดค่าข้อมูลของการออกแบบโดยให้ I_{pk} ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงขอเรียก วิธีการออกแบบโดยให้ I_{pk} ของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ว่า การออกแบบโดยให้พลังงานของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย และ ขอเรียกวิธีการออกแบบโดยให้ I_{pk} ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ว่า การออกแบบโดยให้พลังงานของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย นอกจากนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลังงานและ I_{pk} ของโซลิตอนที่ถูก Normalize ด้วยค่าพลังงานและ I_{pk} ของสัญญาณโซลิตอนที่ต้นทางตามลำดับนั้น ยังทับกันสนิทด้วย ซึ่งลักษณะต่างๆดังกล่าว แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ถึง 4.20



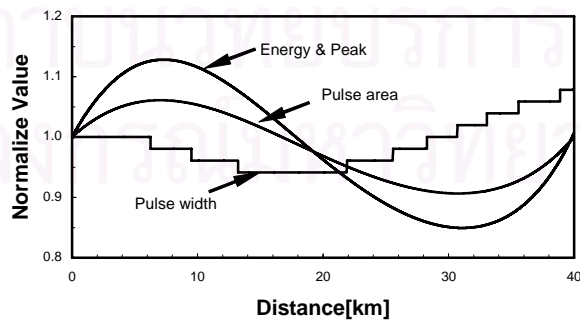
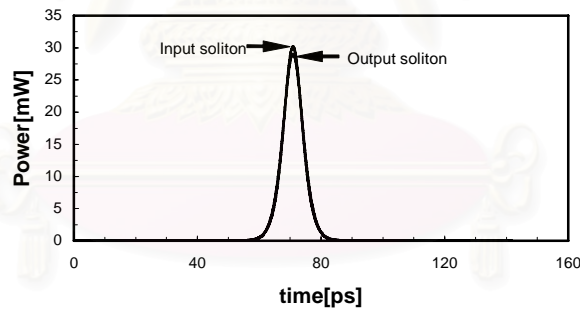
รูปที่ 4.1 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า

$$\frac{L_a}{Z_0} = 0.5$$



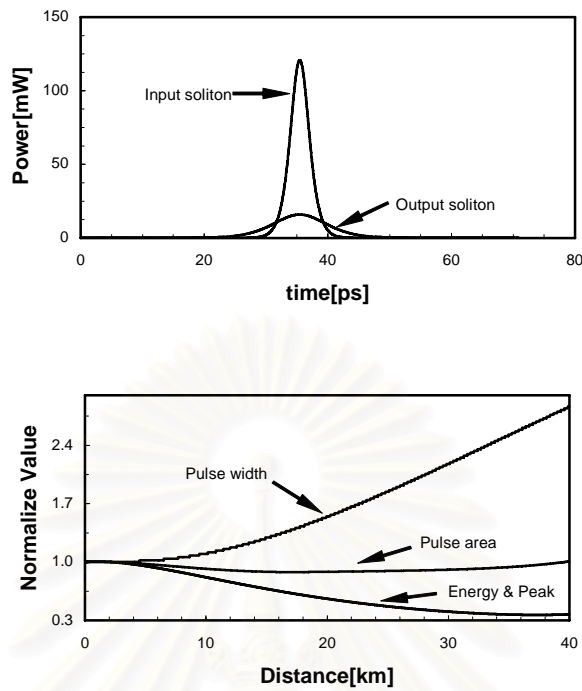
รูปที่ 4.2 พัลส์โซลิตอนที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของโซลิตอน สำหรับการออกแบบโดยให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า

$$L_a/Z_0 = 1$$

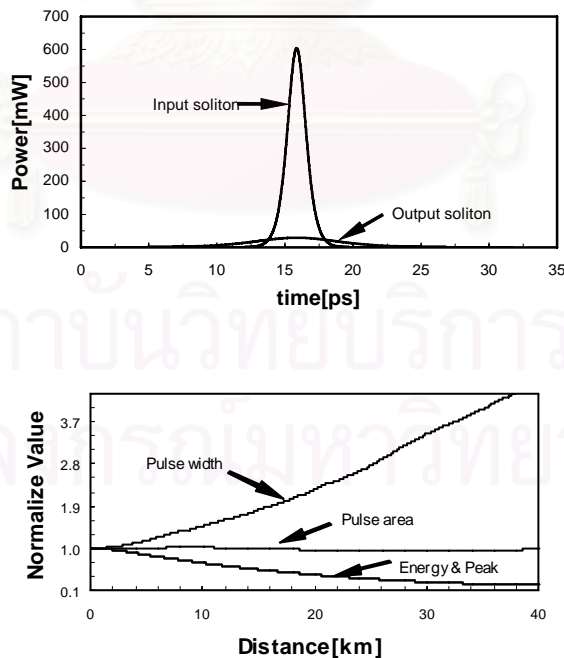


รูปที่ 4.3 พัลส์โซลิตอนที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของโซลิตอน สำหรับการออกแบบโดยให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า

$$L_a/Z_0 = 2$$



รูปที่ 4.4 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 8$

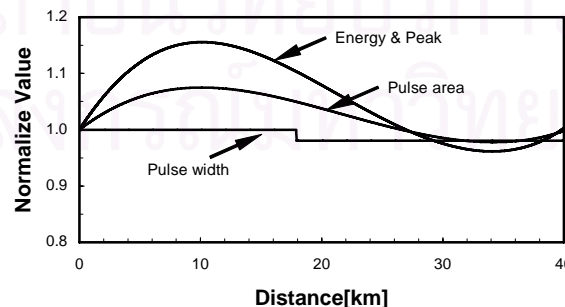
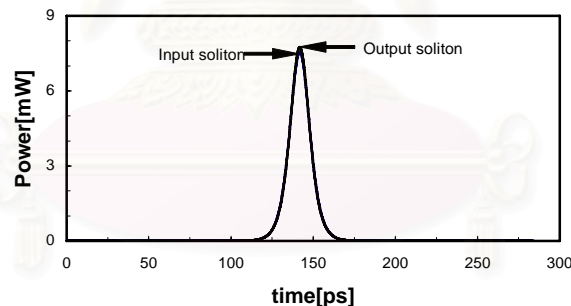


รูปที่ 4.5 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ S ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 40$

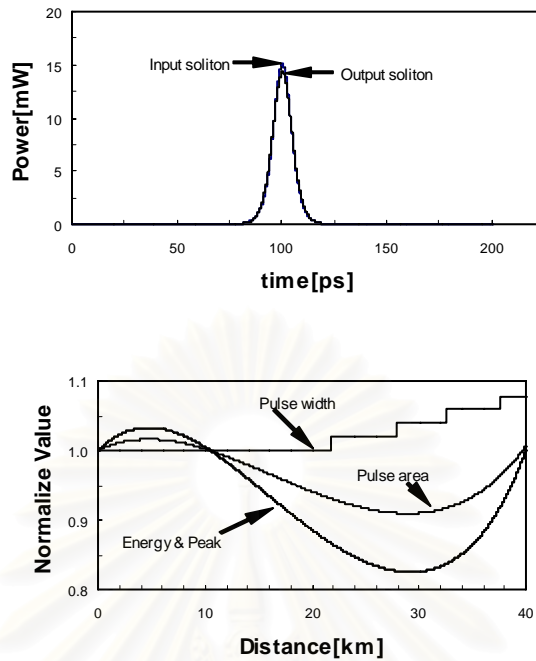
จากรูปที่ 4.1 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 0.5 จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางแทบจะเหมือนกัน โดยไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของพัลส์จากกราฟได้ ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 5\%$ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จนไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงจากกราฟได้เช่นกัน ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 10\%$

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 1 และ 2 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยพัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางมี I_{pk} ต่างกันเล็กน้อย ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 7\%$ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 5\%$ และ $\pm 10\%$ ตามลำดับ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 15\%$

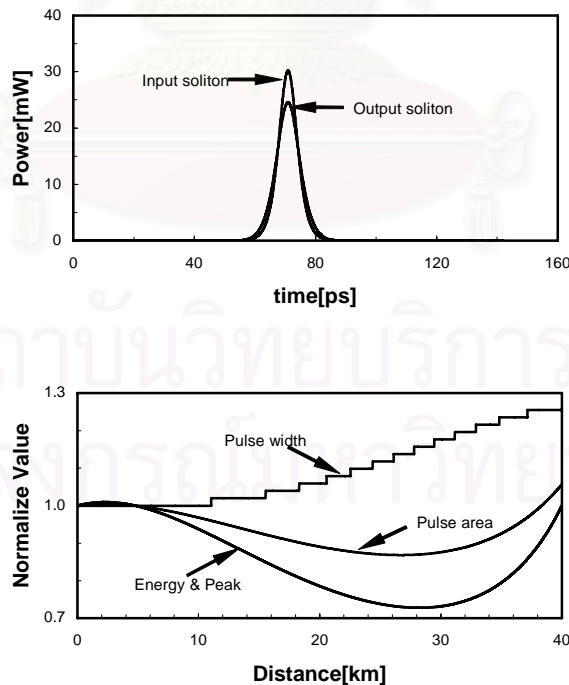
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 8 และ 40 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทาง ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับต้นทางคือเกิน $\pm 100\%$ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเช่นกันเมื่อเทียบกับต้นทางแต่ประมาณไม่เกิน $\pm 100\%$



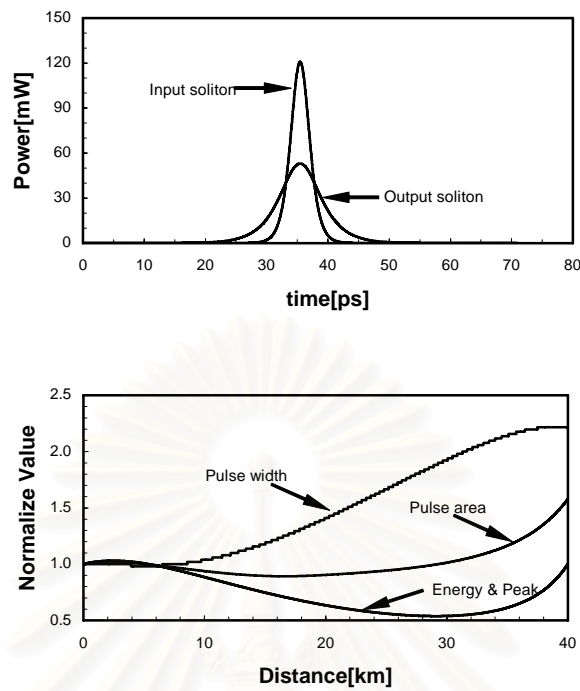
รูปที่ 4.6 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 0.5$



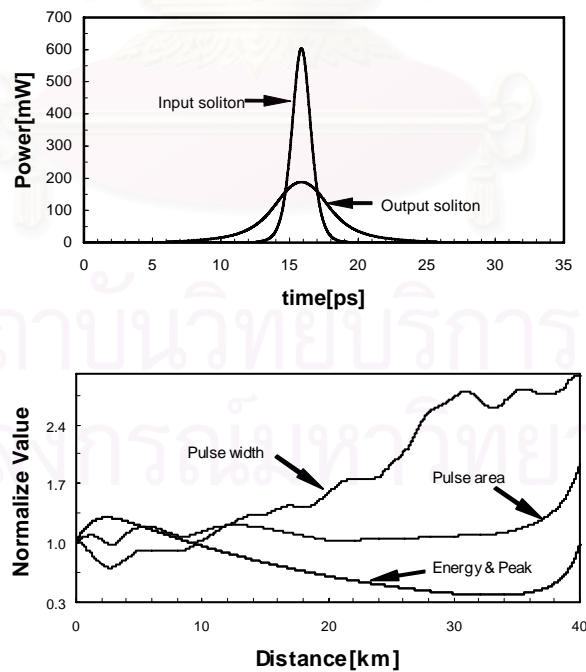
รูปที่ 4.7 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และ การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 1$



รูปที่ 4.8 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และ การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 2$



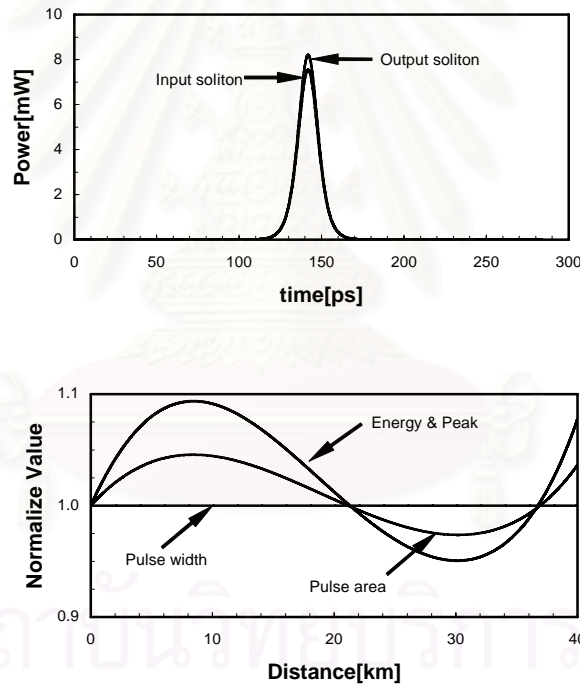
รูปที่ 4.9 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 8$



รูปที่ 4.10 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วง การขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 40$

จากรูปที่ 4.6 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 0.5 จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยพัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางมี I_{pk} ต่างกันเล็กน้อย ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 7\%$ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 5\%$ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 15\%$

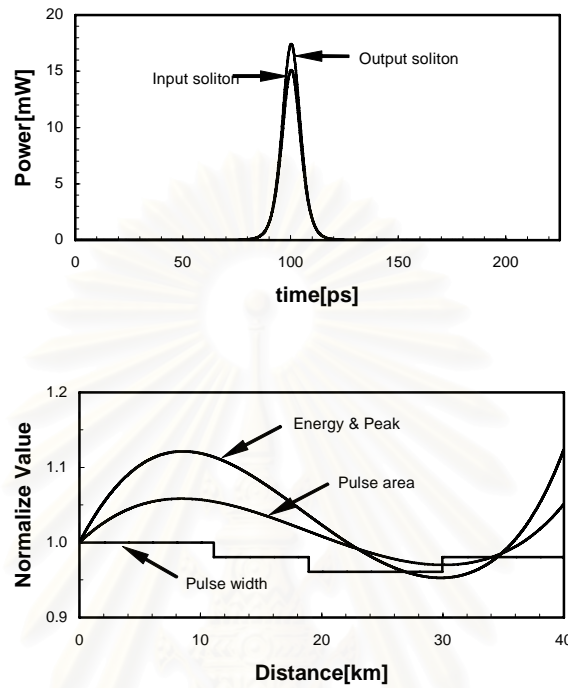
จากรูปที่ 4.7 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 1 และ 2 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยพัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางมี I_{pk} ต่างกันเล็กน้อย ส่วนในรูปที่ 4.8 จะเห็นความแตกต่างของพัลส์สัญญาณได้ชัดเจนขึ้น ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทาง ประมาณไม่เกิน $\pm 10\%$ และ $\pm 15\%$ ตามลำดับ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 10\%$ และ $\pm 30\%$ ตามลำดับ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 20\%$ และ $\pm 30\%$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ δS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 0.5$

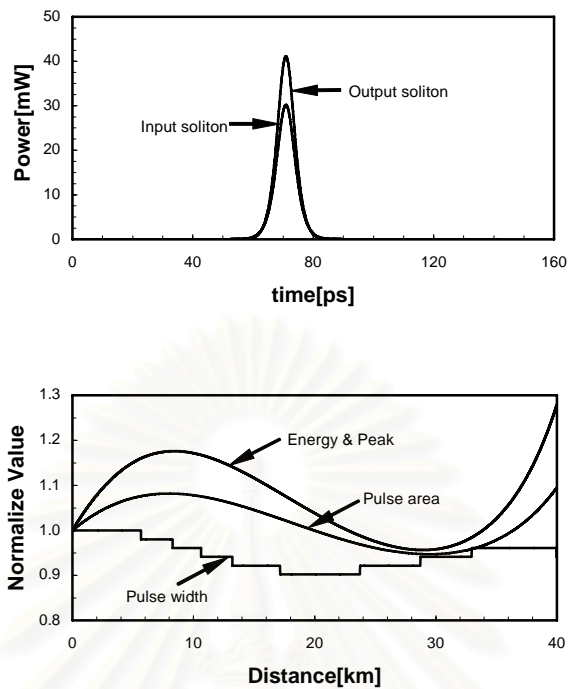
จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 8 และ 40 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงตลอดการเดินทาง และสังเกตเห็นความแตกต่างมากที่สุดเมื่อเทียบกับต้นทางได้ในช่วงปลายทางประมาณไม่เกิน $\pm 50\%$ และ $\pm 70\%$ ตามลำดับ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับต้นทางคือเกิน $\pm 100\%$ ขณะที่ I_{pk}

และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นประมาณไม่เกิน $\pm 50\%$ แม้ว่าจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ปลายทาง

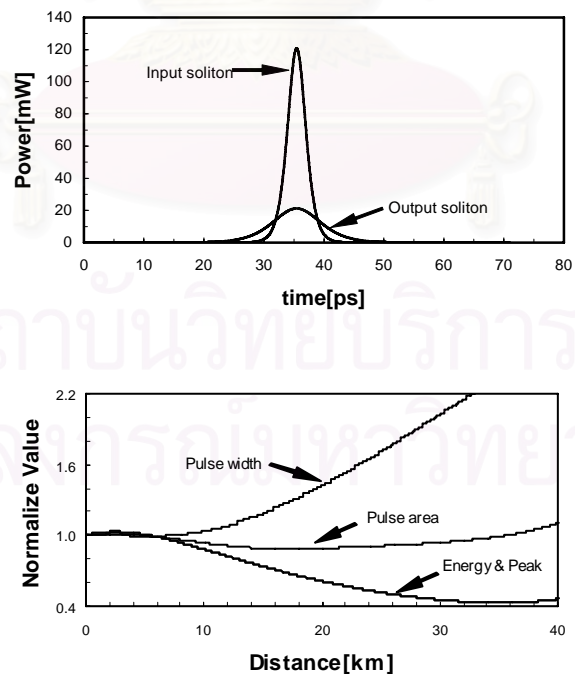


รูปที่ 4.12 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ δS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า

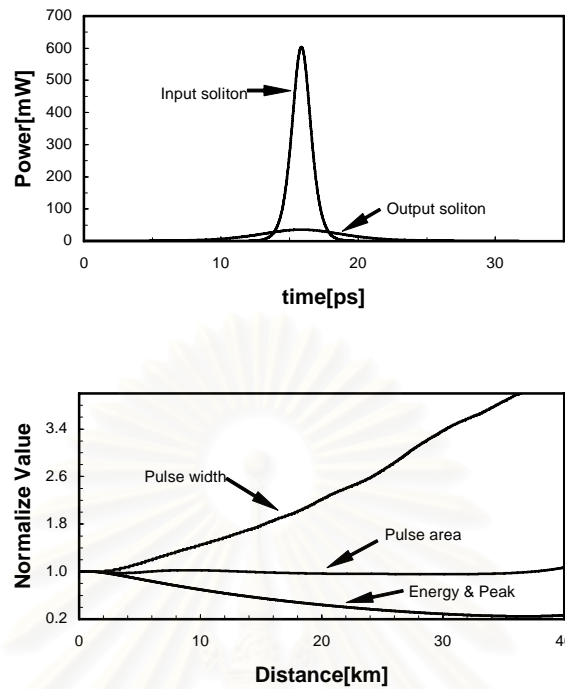
$$\frac{L_a}{Z_0} = 1$$



รูปที่ 4.13 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และ การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ δS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 2$



รูปที่ 4.14 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และ การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ δS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 8$



รูปที่ 4.15 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และ การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ δS ของโซลิตอนมีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 40$

จากรูปที่ 4.11 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 0.5 จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยพัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางมี I_{pk} ต่างกันเล็กน้อย ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 5\%$ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงจากรูปได้ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 10\%$

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 1 และ 2 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีขนาด I_{pk} ต่างกันพอสมควร สามารถสังเกตความแตกต่างของพัลส์สัญญาณได้ ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 7\%$ และ $\pm 10\%$ ตามลำดับ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 5\%$ และ $\pm 10\%$ ตามลำดับ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 15\%$ และ $\pm 30\%$ ตามลำดับ

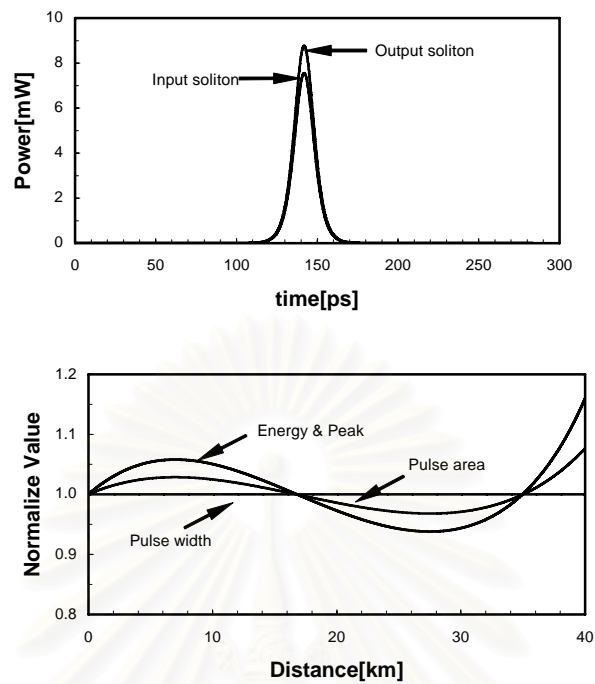
จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 8 และ 40 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางก็ตาม ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ

ต้นทางคือเกิน $\pm 100\%$ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเช่นกัน เมื่อเทียบกับต้นทางแต่ประมาณไม่เกิน $\pm 100\%$

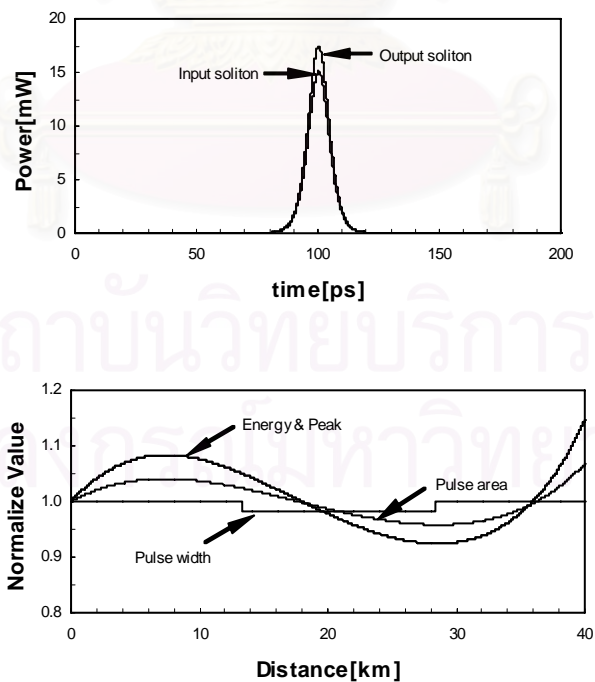
จากรูปที่ 4.16 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 0.5 จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีขนาด I_{pk} ต่างกันพอสมควร สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของพัลส์สัญญาณได้ ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 2.5\%$ ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงจากกราฟได้ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 10\%$ ถึงแม้ว่าจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นที่ปลายทาง

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 1 และ 2 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีขนาด I_{pk} ต่างกันพอสมควร สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของพัลส์สัญญาณได้ ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 5\%$ ถึงแม้ว่าจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นที่ปลายทาง ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 5\%$ และ $\pm 10\%$ ตามลำดับ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับต้นทางประมาณไม่เกิน $\pm 10\%$ และ $\pm 15\%$ ตามลำดับ

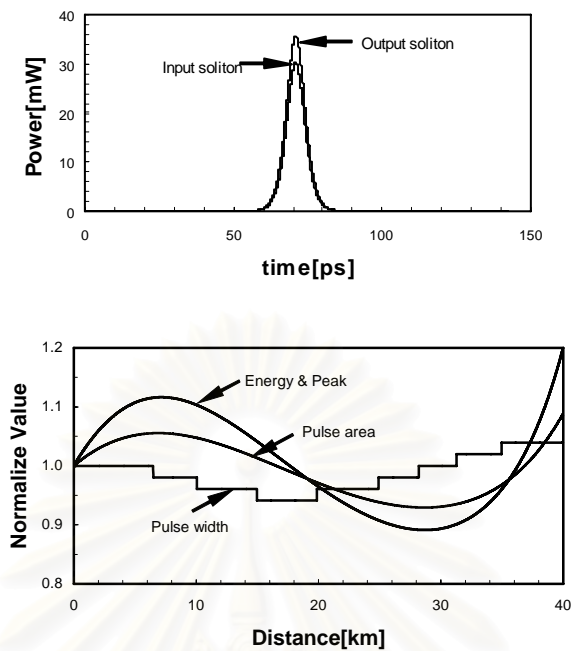
จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 ในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่า 8 และ 40 ตามลำดับ จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ลักษณะของ δS มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางในรูปที่ 4.23 และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยน้อยตลอดการเดินทางเมื่อเทียบกับต้นทางในรูปที่ 4.24 ส่วน τ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับต้นทางคือเกิน $\pm 100\%$ ขณะที่ I_{pk} และพลังงานของพัลส์สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเช่นกันเมื่อเทียบกับต้นทางแต่ประมาณไม่เกิน $\pm 100\%$



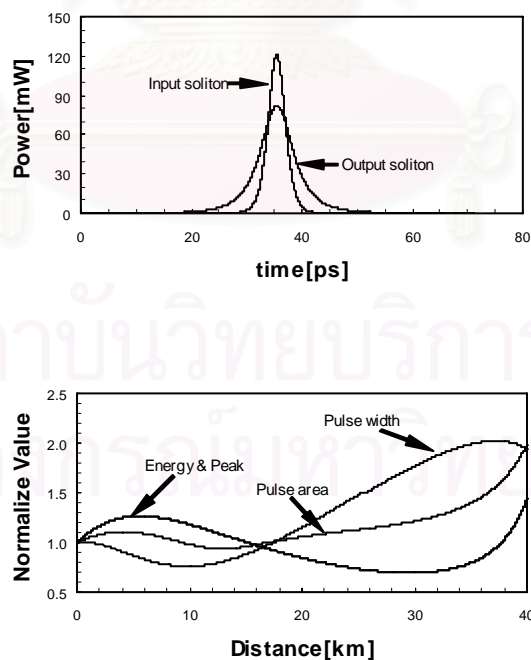
รูปที่ 4.16 พัลส์โซลิตอนที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของโซลิตอน สำหรับการออกแบบโดยให้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 0.5$



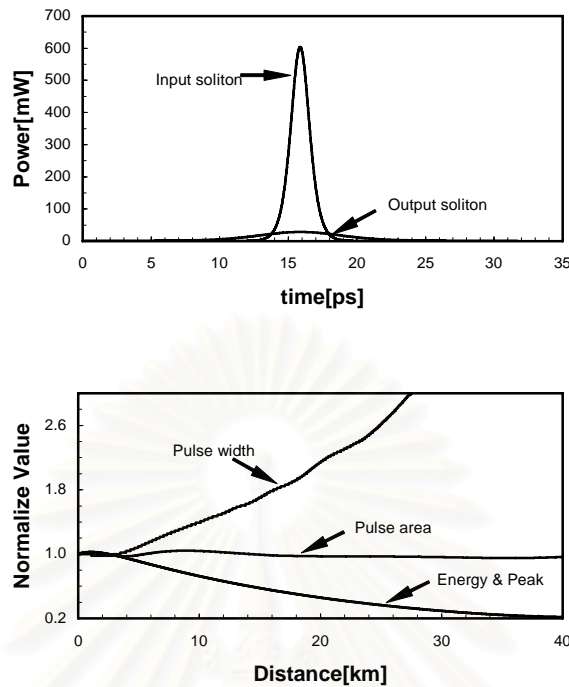
รูปที่ 4.17 พัลส์โซลิตอนที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของโซลิตอน สำหรับการออกแบบโดยให้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 1$



รูปที่ 4.18 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_c/Z_0 = 2$



รูปที่ 4.19 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_c/Z_0 = 8$



รูปที่ 4.20 พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทาง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ สำหรับการออกแบบโดยให้ การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L_a/Z_0 = 40$

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 ถึง 4.20 โดยภาพรวมแล้ว จะเห็นว่าในกรณีที่อัตราส่วน L_a/Z_0 มีค่าน้อยๆ พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางจะมีรูปร่างและ I_{pk} ที่ใกล้เคียงกันมาก จนเกือบทับกันสนิท เช่น เมื่อ L_a/Z_0 มีค่าเท่ากับ 0.5 แต่จะเริ่มเห็นความแตกต่างของ I_{pk} ของพัลส์สัญญาณมากขึ้น เมื่อ L_a/Z_0 มีค่าเท่ากับ 1 และ 2 นอกจากนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่างๆของสัญญาณในแต่ละรูปแบบการขยาย มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ต้นทาง โดยรูปแบบของการออกแบบที่ทำให้ s ของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ดีกว่ารูปแบบอื่นๆเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนในกรณีที่ L_a/Z_0 มีค่ามากขึ้น คือ 8 และ 40 นั้น จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดย I_{pk} ของพัลส์สัญญาณที่ปลายทางลดลงอย่างมาก และ τ ของสัญญาณที่ปลายทางขยายออกมาก ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าว ค่ากำลังของ Pump ที่ใส่เข้าไป ไม่สามารถชดเชยผลของการสูญเสียกำลังของสัญญาณได้เพียงพอ ทำให้สัญญาณสูญเสียความเป็นโซลิตอนไป มีผลให้ SPM ไม่สามารถหักล้างกับผลของ GVD ได้

การจำลองการสื่อสารสัญญาณของงานวิจัยนี้ ได้ทำการคำนวณค่ากำลังของ Pump จากสมการ DRA โดยตรง ที่รวมผลของการสูญเสียกำลังของ Pump ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ ซึ่งต่างจากบทความอ้างอิง [4], [5] ที่ทำการสมมุติว่ากำลังของ Pump ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ ไม่มีการสูญเสียไปและสัญญาณมี

กำลังคงที่ตลอดระยะทาง นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังใช้การประมาณค่ากำลังของ Pump โดยไม่ได้ทำการคำนวณจากสมการ DRA โดยตรงอีกด้วย ดังนั้นผลวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้ น่าจะมีความถูกต้องแม่นยำกว่างานวิจัย [4], [5] เมื่อพิจารณาผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนที่ได้จากงานวิจัยนี้ ที่อัตราส่วน L_a/Z_0 ค่าต่างๆกัน เปรียบเทียบกับผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนจากบทความอ้างอิง [5] สิ่งที่ปรากฏออกมาอย่างชัดเจนคือ การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณจะเป็นแบบ Non-Adiabatic เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงในทางที่ทำให้สัญญาณที่ปลายทางมีความแตกต่างจากสัญญาณที่ต้นทางมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วน L_a/Z_0 โดยที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในช่วง Resonance ซึ่งเป็นช่วงที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงของ S มากที่สุด และเป็นแนวแบ่งที่สัญญาณเริ่มจะมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ช่วง Adiabatic ลักษณะเช่นนี้ ทำให้เราพบว่าการขยายสัญญาณโซลิตอนโดยวิธี DRA นั้นมีคุณลักษณะเดียวกับการขยายสัญญาณโดยใช้ EDFA เพียงแต่ DRA อาจให้คุณภาพของสัญญาณดีกว่า EDFA เนื่องจาก DRA ให้สัญญาณรบกวนน้อยกว่า และสามารถออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณโซลิตอนขณะขยายน้อยกว่า EDFA ทั้งนี้จำเป็นต้องอาศัยผลจากการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนมาช่วยสมทบเพื่อสรุปโดยรวมต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณโซลิตอน

เดินทางในระบบเส้นใยแสง

ข้อมูลจากผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนในบทที่แล้ว ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน L_a/Z_0 มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ เช่น Pulse area พลังงาน และความกว้างพัลส์ของสัญญาณโซลิตอน กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วน L_a/Z_0 มีค่าน้อยๆ พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางจะมีรูปร่างและขนาดของ I_{pk} ที่ใกล้เคียงกัน หรือ แตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่างๆของสัญญาณในแต่ละรูปแบบการขยาย ยังมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ต้นทาง โดยเฉพาะรูปแบบของการออกแบบที่ทำให้ S ของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ดีกว่ารูปแบบอื่นๆเล็กน้อย ส่วนในกรณีที่อัตราส่วน L_a/Z_0 มีค่ามากขึ้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางมีความแตกต่างกัน โดยที่ I_{pk} ของพัลส์สัญญาณที่ปลายทางลดลงอย่างมาก และ τ ของสัญญาณที่ปลายทางขยายออกมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนดังกล่าว ค่ากำลังของ Pump ที่ใส่เข้าไป ไม่สามารถชดเชยผลของการสูญเสียกำลังของสัญญาณได้เพียงพอ ทำให้สัญญาณสูญเสียความเป็นโซลิตอนไป มีผลให้ SPM ไม่สามารถหักล้างกับผลของ GVD ได้

ในบทนี้จะแสดงผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณโซลิตอนเดินทางในระบบเส้นใยแสง โดยเปรียบเทียบผลของการใช้การขยายสัญญาณทั้งแบบ DRA, Lump amplification, และแบบอุดมคติที่ละทิ้งผลของการสูญเสียกำลังสัญญาณในเส้นใยแสง โดยใช้การวัดคุณภาพสัญญาณผ่านค่า Q factor และค่า Bit-error rate (BER)

4.1 ผลการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารสัญญาณโดยใช้ค่า Q factor

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน โดยการขยายสัญญาณด้วยเทคนิค DRA ทั้ง 6 รูปแบบ ที่อัตราส่วน L/Z_0 ต่างๆกัน จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อ L/Z_0 มีค่า 0.5 1 และ 2 ส่วนพัลส์สัญญาณที่ต้นทางกับปลายทางจะมีขนาดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อ L/Z_0 มีค่า 8 และ 40 ทำให้ทราบได้อย่างแน่นอนว่าที่ค่า L/Z_0 ดังกล่าวนั้น ไม่เหมาะสมในการสื่อสารสัญญาณ

การวัดประสิทธิภาพการสื่อสารสัญญาณในโครงการนี้อาศัยค่า Q-factor เป็นเกณฑ์ ค่า Q ซึ่งเป็นพารามิเตอร์บอกคุณภาพสัญญาณนั้น ถูกนิยามไว้ดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5.1)$$

โดยที่ I_1 คือค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของบิต "1" ที่ Detect ได้

I_0 คือค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของบิต "0" ที่ Detect ได้

σ_1 คือ Standard deviation ของกระแสไฟฟ้าบิต "1" ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนและความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากสาเหตุอื่นๆ

σ_0 คือ Standard deviation ของกระแสไฟฟ้าบิต "0" ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนและความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากสาเหตุอื่นๆ

ค่า Q factor เป็นค่าที่พิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างบิต 1 และบิต 0 โดยสัญญาณจะยังคงมีคุณภาพที่ดีและยอมรับได้ เมื่อ Q factor มีค่าไม่น้อยกว่า 6 ซึ่งประมาณได้เท่ากับค่า BER = 10^{-9} ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานขั้นต่ำทั่วไปของระดับคุณภาพสัญญาณที่สามารถยอมรับได้

ค่า Q factor ตามสมการที่ (5.1) นั้นเป็นค่า Q factor ของสัญญาณที่ได้รับการแปลงเป็นไฟฟ้าแล้ว ในกรณีที่สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับบิต "1" และบิต "0" นั้นมีกำลังเท่ากัน จะได้ค่า Q ดังสมการที่

5.2

$$Q = \frac{I_1}{2\sigma_{total}} \quad (5.2)$$

ซึ่งจะสามารถหาค่า BER ได้โดยตรงจากค่า Q โดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (5.3)

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \cong \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (5.4)$$

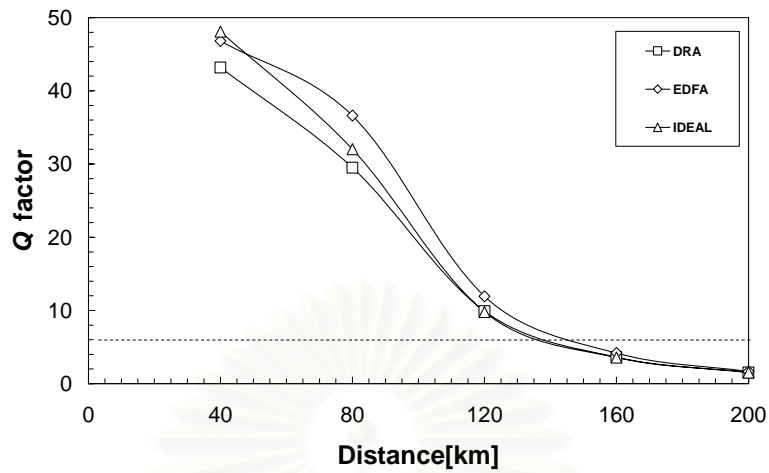
และยังสามารถหาค่า SNR ได้จากค่า Q ดังสมการที่ (5.5)

$$SNR = Q^2 \quad (5.5)$$

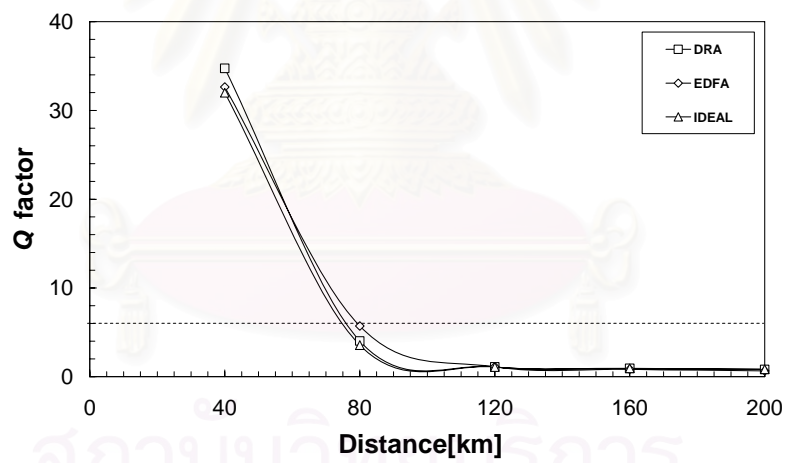
โดยค่า SNR และค่า Q ที่ได้จะมีค่าเท่ากัน ในหน่วย dB ดังแสดงในสมการที่ (5.6)

$$SNR[dB] = 10\log(SNR) = 20\log(Q) = Q[dB] \quad (5.6)$$

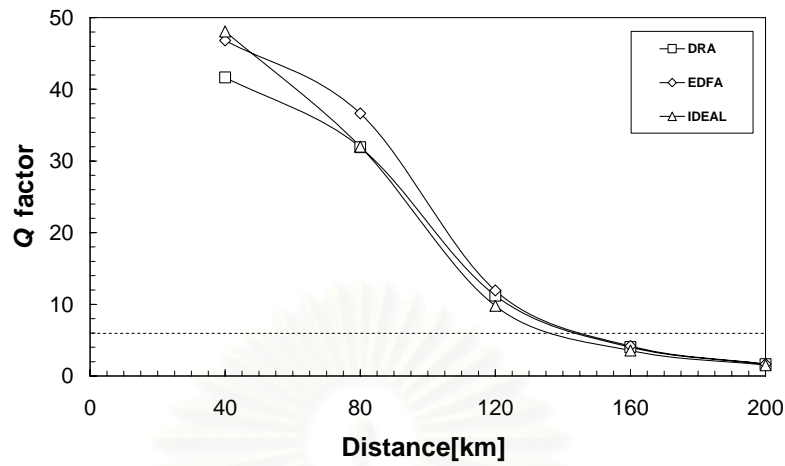
รูปที่ 5.1 ถึง 5.8 แสดงผลการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนขนาด 128 บิต ด้วยเทคนิค DRA รูปแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับการขยายสัญญาณด้วย EDFA และระบบโซลิตอนในอุดมคติ เมื่อ L/Z_0 มีค่า 0.5 และ 1 ตามลำดับ ในการจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ได้ทำการเลือกใช้ค่า Bit rate ค่ากำลังเข้าของโซลิตอน และกำลังของ Raman Pump ตามตารางที่ 4.1-4.6 เพื่อที่จะได้พิกัดสัญญาณที่ได้จากบทที่ 4 ด้วยคุณภาพสัญญาณ



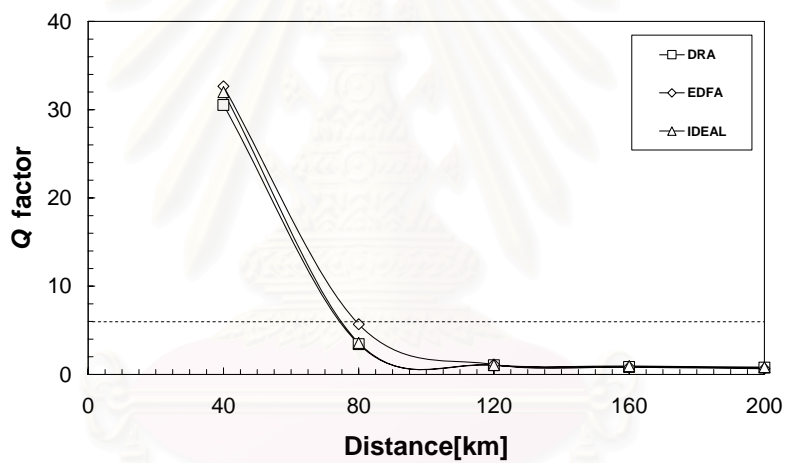
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงค่า Q-factor ของการออกแบบโดยให้ s ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$



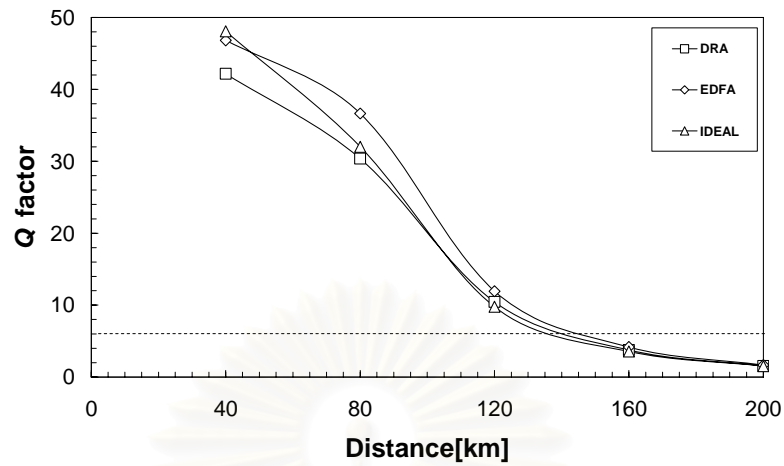
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ s ของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$



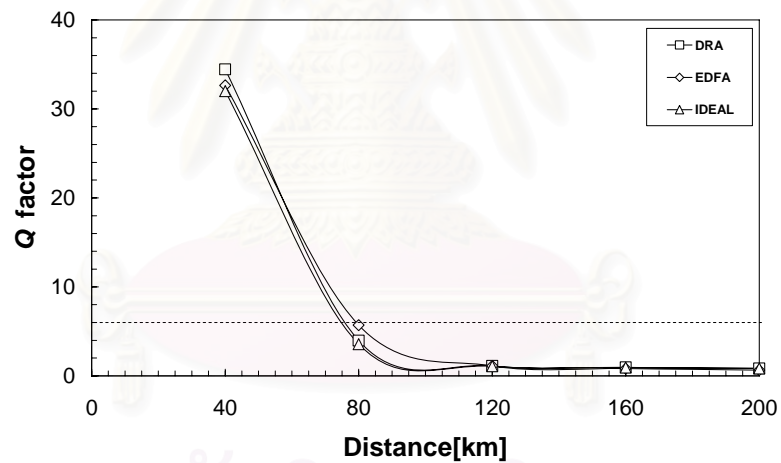
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$



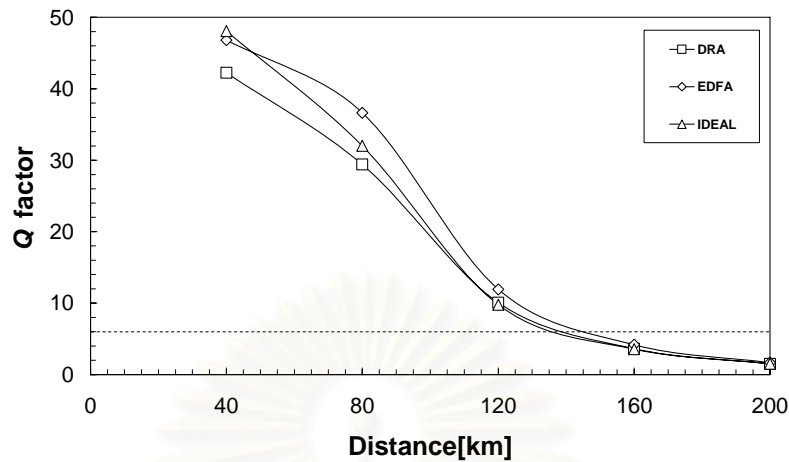
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ พลังงานของโซลิตอน ที่ต้นทางและปลายทาง มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$



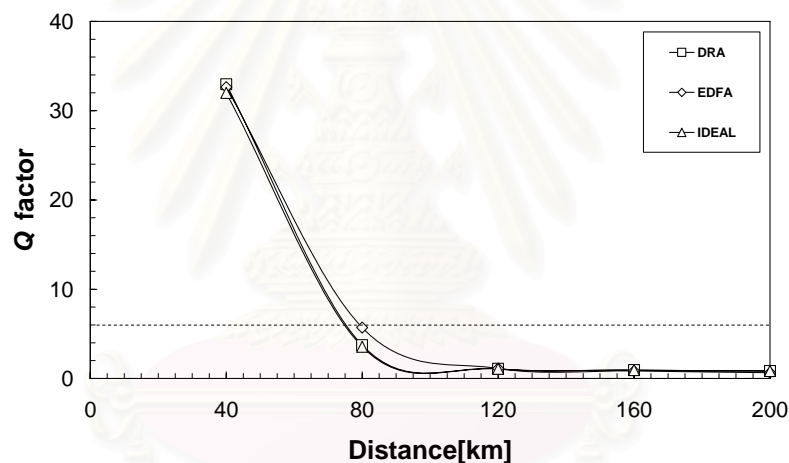
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ ΔS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้ ΔS ของโซลิตอน มีลักษณะเรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้การเปลี่ยนแปลง พลังงานของโซลิตอน มีลักษณะ เรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 0.5$



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่า Q factor ของการออกแบบโดยให้การเปลี่ยนแปลง พลังงานของโซลิตอน มีลักษณะ เรียบตลอดการเดินทางในระหว่างช่วงการขยาย ที่ค่า $L/Z_0 = 1$

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.1 ถึง 5.8 โดยภาพรวมแล้ว จะเห็นว่าผลของการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารสัญญาณ ของแต่ละรูปแบบการขยายสัญญาณนั้น มีลักษณะที่คล้ายและใกล้เคียงกันมาก คือ ค่า Q-factor ของแต่ละระบบจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง และจะเห็นว่า Q-factor ของทั้ง 3 ระบบมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นว่าค่า Q-factor ของระบบที่ใช้ DRA และระบบที่ใช้ EDFA นั้นมีผลที่ไม่ต่างกับระบบโซลิตอนในอุดมคติ ถึงแม้จะพบลักษณะที่น่าสนใจว่า เมื่อ L/Z_0 มีค่า 0.5 และ 1 ส่วนในกรณีนี้ L/Z_0 มีค่าเท่ากับ 2 จะยิ่งเห็นได้ชัดว่า ระบบที่ใช้ DRA มีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้ความเป็นระบบโซลิตอนในอุดมคติมากกว่าระบบที่ใช้ EDFA ผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ยืนยัน

เบื้องต้นจากที่ได้พิสูจน์แล้วว่า การขยายสัญญาณโดย DRA นั้นเป็นขบวนการแบบ Non-adiabatic เช่นเดียวกันกับการใช้ Lump amplifier อย่าง EDFA

เปรียบเทียบการขยายสัญญาณโซลิตอนด้วยวิธี DRA กับ EDFA แล้ว เมื่อ L/Z_0 มีค่ามากขึ้น DRA จะให้ผลที่ดีกว่า EDFA เนื่องจาก DRA ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอนในช่วงการขยายสัญญาณ ทำให้เกิด Dispersive wave หลุดออกจากสัญญาณโซลิตอนปริมาณไม่มากนัก ข้อได้เปรียบที่ที่สองคือ การที่ DRA สร้างสัญญาณรบกวนปริมาณที่น้อยกว่า EDFA จึงมีผลทำให้สัญญาณโซลิตอนที่ถูกขยายด้วย DRA จะสามารถสื่อไปได้ไกลกว่าการใช้ EDFA อย่างไรก็ตามการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงผลข้างต้นนั้น มีระยะการสื่อสารสัญญาณที่สั้นมาก ทั้งนี้เนื่องจากการ Set up การคำนวณนั้น ไม่ได้สนใจอัตราเร็วของข้อมูล สนใจเพียงแต่การกำหนด L/Z_0 ให้เป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นอัตราเร็วข้อมูลอาจสูงจนแม้กระทั่งสัญญาณโซลิตอนอุดมคติยังไม่สามารถสื่อไปได้ไกลเป็นจำนวนหลายคาบของการขยายสัญญาณ

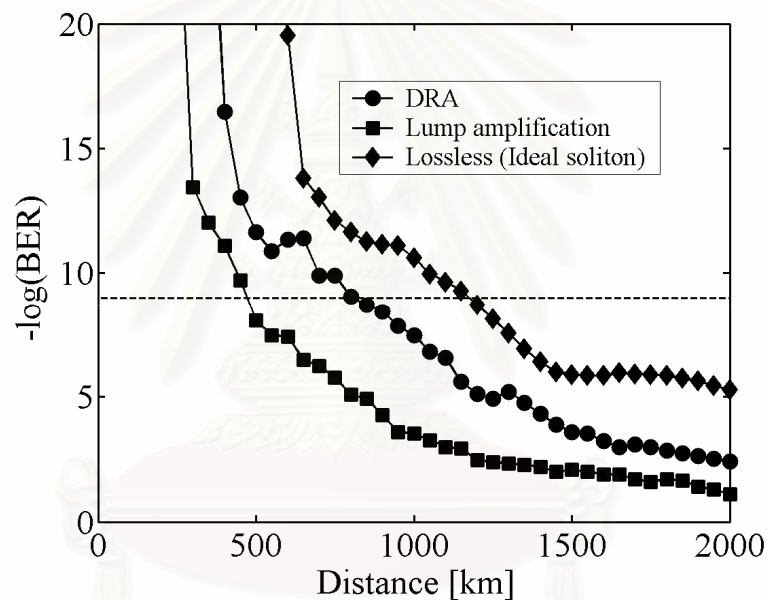
ดังนั้น เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลเมื่อสัญญาณเดินทางไปได้ระยะทางหลายคาบของการขยายสัญญาณ จึงได้ทำการกำหนดอัตราส่งข้อมูลที่ต่ำลง และปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์อื่นเพื่อให้ได้ค่า L/Z_0 ตามต้องการ

ในการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์นั้น ใช้พารามิเตอร์ต่างๆเท่ากับที่ผ่านมา เพียงแต่ใช้การปรับค่า Duty cycle ของสัญญาณเพื่อจะได้ค่า L/Z_0 ตามต้องการ โดยที่กำหนดค่า Dispersion ของระบบไว้ที่ -1 ps/km/nm และอัตราเร็วข้อมูลสามารถกำหนดไว้ไม่เปลี่ยนแปลงได้ ในการวัดคุณภาพสัญญาณนั้นจะทำการแปลงค่า Q factor ที่ได้เป็นค่า BER ซึ่งได้กำหนดค่า BER อย่างต่ำที่ควรจะได้ไม่มากกว่า 10^{-9} ซึ่งประมาณเท่ากับ $Q = 6$ การขยายสัญญาณโซลิตอนด้วย DRA นั้นจะเลือกใช้แบบกรณีที่ออกแบบให้กำลังของโซลิตอนคงที่ตลอดในคาบของการขยาย เนื่องจากเป็นกรณีซึ่งได้แสดงให้เห็นในบทที่แล้วๆมาว่าให้ผลของการสื่อสารสัญญาณที่ดีกว่าการออกแบบ DRA แบบอื่น

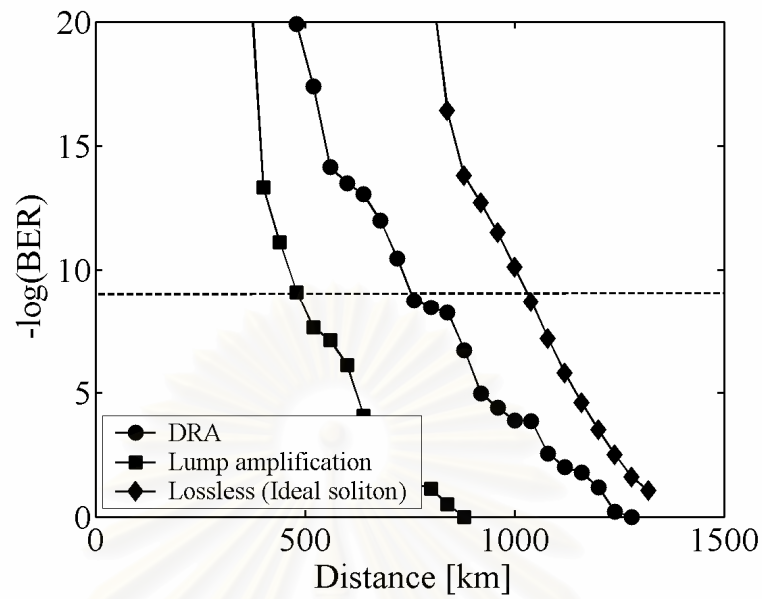
รูปที่ 5.9 ถึง 5.11 แสดงค่ากำลังที่เป็นค่าบวกของ BER ที่วัดจากสัญญาณโซลิตอนที่ระยะทางต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง การขยายสัญญาณด้วย DRA EDFA และโซลิตอนในอุดมคติ

รูปที่ 5.9 นั้นแสดงผลในกรณีอัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps ค่า Duty cycle = 30% และคาบของการขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km ในการ Set up การคำนวณครั้งนี้ทำให้ได้ $L/Z_0 = 0.15$ ส่วนรูปที่ 5.10 นั้นแสดงผลในกรณีอัตราข้อมูลเท่ากับ 20 Gbps ค่า Duty cycle = 20% และคาบของการขยายสัญญาณเท่ากับ 40 km ในการ Set up การคำนวณครั้งนี้ทำให้ได้ $L/Z_0 = 1$ และท้ายที่สุด รูปที่ 5.11 นั้นแสดงผลในกรณีอัตราข้อมูลเท่ากับ 40 Gbps ค่า Duty cycle = 20% และคาบของการขยายสัญญาณเท่ากับ 20 km ในการ Set up การคำนวณครั้งนี้ทำให้ได้ $L/Z_0 = 2$ ผลจากรูปทั้งสามแสดงแนวโน้มอย่างที่เราคาดหวังไว้คือระบบซึ่งใช้ DRA ในการขยายสัญญาณนั้นให้ผล BER ในระยะทางต่างๆได้ดีกว่าและเข้าใกล้ค่าความเป็นอุดมคติได้ดีกว่าระบบซึ่งใช้ EDFA โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วน L/Z_0 มีค่ามากขึ้นแนวโน้มยิ่งชัดเจนขึ้น

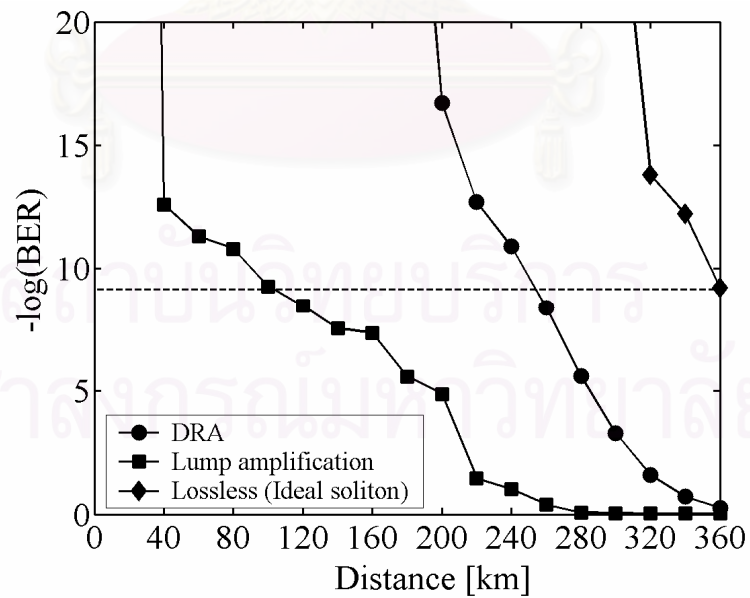
เนื่องจากดังที่ได้กล่าวและพิสูจน์มาแล้วว่า เมื่อ L/Z_0 มีค่ามากขึ้น DRA จะให้ผลที่ดีกว่า EDFA เนื่องจาก DRA ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโซลิตอนในช่วงการขยายสัญญาณ ทำให้เกิด Dispersive wave หลุดออกจากสัญญาณโซลิตอนปริมาณไม่มากนัก และ DRA สร้างสัญญาณรบกวนปริมาณที่น้อยกว่า EDFA จึงมีผลทำให้สัญญาณโซลิตอนที่ถูกขยายด้วย DRA จะสามารถถือไปได้ไกลกว่าการใช้ EDFA



รูปที่ 5.9 ค่า BER ของสัญญาณโซลิตอนความเร็ว 10 Gbps โดยมี Duty cycle = 30% มีคาบการขยายสัญญาณเท่ากับ 50 km และ $L/Z_0 = 0.15$



รูปที่ 5.10 ค่า BER ของสัญญาณโซลิตอนความเร็ว 20 Gbps โดยมี Duty cycle = 20% มีคาบการขยายสัญญาณเท่ากับ 40 km และ $L/Z_0 = 1$



รูปที่ 5.11 ค่า BER ของสัญญาณโซลิตอนความเร็ว 40 Gbps โดยมี Duty cycle = 20% มีคาบการขยายสัญญาณเท่ากับ 20 km และ $L/Z_0 = 2$

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้เทคนิค DRA เพื่อชดเชยการสูญเสียกำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารสัญญาณโซลิตอนแสง และทำการออกแบบแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอน ทำการขยายสัญญาณด้วยเทคนิค DRA ในรูปแบบต่างๆ พร้อมทั้งทำการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารสัญญาณในแต่ละรูปแบบของการขยาย รวมถึงเปรียบเทียบผลที่ได้กับการขยายด้วย EDFA

ข้อมูลจากผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนในโครงการนี้ ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน L_a/Z_0 มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณ เช่น Pulse area กำลังงาน และความกว้างพัลส์ของสัญญาณโซลิตอน กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วน L_a/Z_0 มีค่าน้อยๆ พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางจะมีรูปร่างและขนาดของ I_{pk} ที่ใกล้เคียงกัน หรือ แตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่างๆของสัญญาณในแต่ละรูปแบบการขยาย ยังมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ต้นทาง โดยเฉพาะรูปแบบของการออกแบบที่ทำให้ S ของโซลิตอนที่ต้นทางและปลายทางมีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงการขยาย จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ดีกว่ารูปแบบอื่นๆเล็กน้อย ส่วนในกรณีที่อัตราส่วน L_a/Z_0 มีค่ามากขึ้น จะเห็นได้ชัดเจนว่า พัลส์สัญญาณที่ต้นทางและปลายทางมีความแตกต่างกัน โดยที่ I_{pk} ของพัลส์สัญญาณที่ปลายทางลดลงอย่างมาก และ τ ของสัญญาณที่ปลายทางขยายออกมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนดังกล่าว ค่ากำลังของ Pump ที่ใส่เข้าไป ไม่สามารถชดเชยผลของการสูญเสียกำลังของสัญญาณได้เพียงพอ ทำให้สัญญาณสูญเสียความเป็นโซลิตอนไป มีผลให้ SPM ไม่สามารถหักล้างกับผลของ GVD ได้

การจำลองการสื่อสารสัญญาณของงานวิจัยนี้ ได้ทำการคำนวณค่ากำลังของ Pump จากสมการ DRA โดยตรง ที่รวมผลของการสูญเสียกำลังของ Pump ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ ซึ่งต่างจากบทความอ้างอิง [5] ที่ทำการสมมติว่ากำลังของ Pump ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ ไม่มีการสูญเสียไปและสัญญาณมีกำลังคงที่ตลอดระยะทาง นอกจากนี้ บทความ [5] ยังใช้การประมาณค่ากำลังของ Pump โดยไม่ได้ทำการคำนวณจากสมการ DRA โดยตรงอีกด้วย ดังนั้นผลวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้ น่าจะมีความถูกต้องแม่นยำกว่างานวิจัย [5] เมื่อพิจารณาผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนที่ได้จากงานวิจัยนี้ ที่อัตราส่วน L_a/Z_0 ค่าต่างๆกัน เปรียบเทียบกับผลการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนจากบทความ [5] สิ่งที่ปรากฏออกมาอย่างชัดเจนคือ การเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างๆของสัญญาณจะเป็นแบบ Non-Adiabatic เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงในทางที่ทำให้สัญญาณที่ปลายทางมีความแตกต่างจากสัญญาณที่ต้นทางมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วน L_a/Z_0 โดยที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในช่วง Resonance ซึ่งเป็นช่วงที่สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงของ S มากที่สุด และเป็นแนวแบ่งที่สัญญาณเริ่มจะมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ช่วง Adiabatic ลักษณะเช่นนี้ ทำให้เราพบว่า การขยายสัญญาณโซลิตอนโดยวิธี DRA นั้นมีคุณลักษณะเดียวกับการขยายสัญญาณโดยใช้ EDFA เพียงแต่ DRA อาจให้คุณภาพของสัญญาณดีกว่า EDFA

เนื่องจาก DRA ให้สัญญาณรบกวนน้อยกว่า และสามารถออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณโซลิตอนขณะขยายน้อยกว่า EDFA หลังจากการทำการจำลองการสื่อสารสัญญาณโซลิตอนและวัดคุณภาพสัญญาณด้วยค่า Q factor และค่า BER พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับคำสมมติฐานดังกล่าวที่ได้ตั้งไว้อย่างมาก

โครงการนี้แม้ว่าจะใช้วิธีเชิงเลขในการศึกษาก็ตาม ผู้วิจัยได้คำนึงถึงคุณสมบัติและปรากฏการณ์หลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับระบบอย่างครบถ้วน จึงอาจอ้างได้ว่าผลการศึกษาที่ได้นั้น อาจไม่ต่างกันมากกับผลที่ได้รับจริงหากมีการทำการทดลอง โดยที่ปรากฏการณ์ย่อยต่างๆเช่น GVD อันดับสูง การสั่นกระพือของค่า GVD ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และผลของ Polarization-mode dispersion (PMD) นั้น อาจส่งผลทำให้ผลที่ได้จากการทดลองนั้นดูแย่กว่าไปบ้างเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำการจำลองทางคณิตศาสตร์ในโครงการนี้ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยคาดว่าผลการวิจัยนี้จะสามารถเป็นจุดเริ่มต้นสำคัญที่ทำให้เกิดแรงจูงใจให้เกิดผลงานวิจัยต่อยอดในการนำเทคนิค DRA มาใช้เพื่อทำให้โซลิตอนแสงเข้าสู่ความเป็นอุดมคติให้มากที่สุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หนังสืออ้างอิง

- [1] G.P.Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd Ed., Academic Press, New York, 2001.
- [2] F. Mollenauer, S. G. Evangelides Jr., and H. A. Haus, " Long-distance soliton propagation using lumped amplifiers and dispersion shifted fiber, " *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 194-196, 1991.
- [3] M. N. Islam, " Raman amplifiers for telecommunications, " *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 8, no. 3, pp. 548-559, 2002.
- [4] A. Hasegawa, " Numerical study of optical soliton transmission amplified periodically by the stimulated Raman process, " *Applied Optics*, vol. 23, no. 19, pp. 3302-3309, 1984.
- [5] L. F. Mollenauer, J. P. Gordon, and M. N. Islam, " Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss, " *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 1, pp. 157-173, 1986.
- [6] H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarijaona, " Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier, " *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 530–532, 1999.
- [7] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipes in C*, 2nd Ed., Cambridge university press, Cambridge, 1997.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลของงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

- P. Kaewplung, Ekachai Konboonsod, and Preeda Jarupoom, “Numerical study on optical soliton amplification using distributed Raman amplification, “ in *Proc. 4th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN2005)*, Bangkok, Thailand, Dec. 14-16, 2005.
- P. Kaewplung, Ekachai Konboonsod, and Preeda Jarupoom, “Non-Dispersion-Managed Soliton Amplification Using Distributed Raman Amplification, “ Submitted to *IEEE TENCON 2006*, Hong Kong, China, Nov. 14-17, 2006.

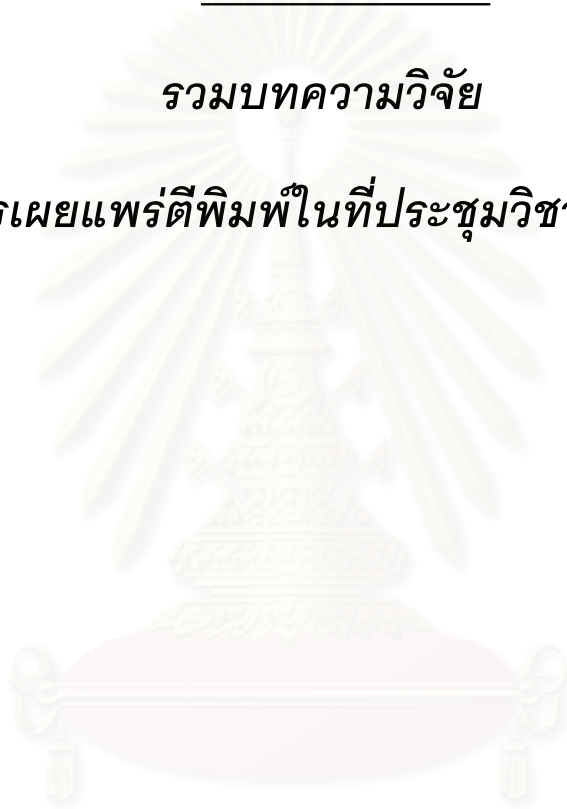


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

รวมบทความวิจัย

ที่ได้รับการเผยแพร่ตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ICO CN 2005

The 4th International Conference on Optical Communications and Networks

14 - 16 December 2005

Inter Continental Hotel, 973 Okiebogut Road, Bangkok Thailand



Organized by
Mahanakorn University of Technology
OSA Thailand Chapter
IEEE - LEOS Thailand Chapter
SPIE Thailand Chapter



Content



The International Society
of Optical Engineers

NUMERICAL STUDY ON OPTICAL SOLITON AMPLIFICATION USING DISTRIBUTED RAMAN AMPLIFICATION

Pasu Kaewplung, Ekachai Kongboonsod, and Preeda Jarupoom

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
E-mail: Pasu.K@Chula.ac.th

ABSTRACT

Optical soliton, amplified by the distributed Raman amplification (DRA), is numerically studied using more accurate method than previous works. In our work, the Raman gain is actually designed by numerically solving the Raman equations, which include both the pump depletion and the soliton depletion. Our results predict that only the non-adiabatic region exists for the soliton amplification in DRA. The soliton behavior in the chain of DRA is found to be identical to the soliton amplification using the lump amplification, where the ratio of the amplifier span and the soliton period plays a dominant role in limiting the transmission distance. However, comparing to the lump amplification at the same ratio of the amplifier span and the soliton period, our simulation results demonstrate that better transmission result is achieved by the DRA due to smaller soliton power fluctuation, as well as smaller amount of generated amplifier noise.

Keywords: Optical soliton, fiber dispersion, fiber nonlinearity, dispersion compensation, optical amplifiers, Erbium-doped fiber amplifier, distributed Raman amplification.

1. INTRODUCTION

It has been widely recognized that the constraint of non-dispersion-managed (DM) soliton amplification by lump amplification is that the amplifier span must be chosen at the length much shorter than characteristic length called the soliton period [1], in order to reduce the dispersive wave generated from the soliton due to the perturbation caused by the soliton power fluctuation. This constraint is sometimes very impractical because, for relatively-high data rate, the soliton period may become an unreasonable value such several kilometers.

As an alternative way for non-DM soliton amplification, the distributed Raman amplification (DRA) gain provided by the stimulated Raman scattering in optical fiber [2] can also be applied. The idea of soliton amplification by the DRA was first studied by Hasegawa [3], and then, was further explored in details by Mollenauer et al. [4]. However, the concept of all-optical transmission using the DRA gave its position to the lump amplification based on the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) during the 1990s because no high-power pump laser available in that decade, and also the discovery of the DM soliton [5] that can partly

overcome the constraint of amplification. Since it becomes possible to realize the high-power semiconductor lasers for DRA nowadays. Moreover, the DRA offers several advantages to EDFA, such as wider amplification bandwidth, higher optical-signal-to-noise-ratio (OSNR), this DRA using transmission fiber now is currently attracting interest again [6].

In the study [4] of non-DM soliton amplification by DRA, Mollenauer et. al. introduced the use of pulse area for examining the amount of dispersive wave radiated from soliton in the link of DRA for several ratios of the DRA span: L_a and the soliton period: Z_0 . They pointed out that the pulse behavior can be classified into three principle regions: (1) $L_a \gg 8Z_0$, where they called "adiabatic region" because the pulse keeps its hyperbolic-secant shape during the propagation, (2) $L_a = 8Z_0$, where they called "resonance" because the pulse area, the soliton width, and the soliton power undergo wild fluctuations, and (3) $L_a \ll 8Z_0$, where they called "non-adiabatic region" because the pulse changes its shape without conserving the soliton properties. However, it becomes the nearly the soliton again at the end of span as long as the ratio between L_a and Z_0 is small enough.

In fact, the works [3] and [4] have not yet taken into account the pump depletion when the pumps transfer their powers to soliton pulses. Moreover, the soliton power was assumed to be constant. This is not quite good assumption for real DRA. For designing the DRA for soliton amplification, in fact, it is necessary to numerically solve the 4-coupled DRA equations governing for forward pump, backward pump, soliton, and amplifier noise evolutions, to obtain the actual pump powers. Moreover, Hasegawa and Mollenauer only designed the DRA gain to completely cancel for the fiber loss in amplifier span. In their schemes, the soliton power at the output end of span becomes equal to that of the input, while the soliton may experience the severe change in pulse area during the span. There still exists several other designs of the distributed gain offered by the DRA should give significantly better result than their works.

In this paper, again, we study the soliton amplification by DRA, but with more accurate method than [3] and [4]. In our work, the DRA gain is actually designed by numerically solving the DRA equations, which include both the pump and the soliton depletions. These two effects are very important and they have been neglected in previous studies. Our results newly show that only the non-adiabatic region exists for the soliton amplification by DRA, independently on how much L_a/Z_0 is. Then, we show that the soliton behavior in the chain of DRA is identical to the soliton amplification using the lump amplification, in which the requirement of $L_a/Z_0 < 1$ plays a dominant role in limiting the span length. However, we finally demonstrated that, at the same ratio of L_a/Z_0 , the DRA gives better transmission result than the lump amplification because of smaller perturbation caused by soliton power fluctuation, as well as smaller amount of generated amplifier noise.

2. OBSERVATION OF ONLY NONADIABATIC SOLITON AMPLIFICATION BY DRA

Raman gain in optical fiber arises from the transfer of power from one optical beam to another that is down shifted in frequency by the energy of an optical phonon [2]. Practically this can be implemented by inject high power laser pump whose frequency is higher than the signal carrier frequency by an amount of Raman frequency shift (13 THz) into a transmission fiber [2]. The Raman gain exhibits the gain over a large bandwidth up to 40 THz.

For the actual design of the DRA gain, it is necessary to use the 4-coupled DRA equations [7], which govern for the evolutions of the forward pump, the backward pump, the signal, and the generated noise. In our work, 4 interesting cases of design are studied: (a) the design for obtaining the soliton pulse area at the end of the DRA span identical to that of the input as much as possible, (b) the design for obtaining the soliton power at the end of the DRA span identical to that of the input as much as possible, (c) the design for obtaining almost constant pulse area during the propagation in the DRA span, and (d) the design for preserving the soliton power along the propagation in the DRA span. It should be noted that the case (b) is the common design for DRA for justly compensating for the fiber loss in the span. The works [3] and [4] also design the DRA gain following the case (b), however, without using the exact DRA equations.

From the DRA equations, since the signal power evolution in the bi-directional pumping DRA depends on the pump powers launched into the fiber, the target distributed gain in the DRA link can be designed by only using appropriate pump powers. To obtain those powers, we numerically solve the 4-coupled DRA equations using the 4th-order Runge-Kutta method (RK4) for single-wavelength pumping. In our calculation, Raman gain spectrum with polarization factor of 2, and attenuation spectrum of silica fiber shown in [2] is taken.

For a given input signal power, to obtain the target gain, the DRA equations are solved iteratively until we obtain the optimal bi-directional input pump powers which yield the least normalized root-mean-square error between the target gain and the constructed gain.

For the design that requires the information of soliton evolution during the propagation in the span (case (c) and (d)), the optical soliton propagation is simulated by solving the nonlinear Schrodinger equation (NLSE) with the split-step Fourier method (SSFM) [2]. The calculation step is always chosen at a value that gives the step error less than 0.01 %. To simulate signal propagation in DRA, the distributed gain for each integration step of the SSFM is calculated from the DRA equations, then, the distributed gain is acted as a gain/loss in the NLSE for that step. Similarly, the amount of noise generated within the step length of DRA is also computed, then, is used for calculating of Gaussian distribution of noise. The noise will be randomly added to the signal bandwidth at end of that step. The dispersion-shifted fiber (DSF) is assumed for soliton transmission line. The attenuation for soliton wavelength in DSF is assumed to be 0.2 dB/km, the dispersion value: D is -1 ps/km/nm, the nonlinear coefficient: γ is $2.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$.

The most important quantity in this work is the ratio between L_a and Z_0 . We define this parameter as the normalized amplifier span l_a , which can be obtained as

$$l_a = \frac{40000B^2\lambda^2DL_a}{c\delta^2}, \quad (1)$$

where c denotes the velocity of light in vacuum, δ duty cycle in percentage unit, B data rate, λ the soliton signal wavelength, D the operating dispersion.

Table I and II shows the examples of the optimum input forward (P_f) and backward (P_b) pump powers with their corresponding soliton powers (P_s) and B for several l_a for fixed L_a at 40 km, for the design of case (b) and (d), respectively. The results of case (a) and (c) are not shown here due to limited space. The results show the possibility of amplifying soliton pulses using DRA with several schemes not only the common design as the case (b). It should be noted that $l_a \leq 1$, $l_a = 8$, and $8 \leq l_a \leq 40$ are corresponding for the non-adiabatic, resonance, and the adiabatic soliton amplifying regions predicted by [4], respectively.

Focusing on the case (b) in order to compare our result with the work [4], Fig. 1(a)-(d) show the evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width, and soliton power (energy) for $l_a = 0.5, 1, 8$, and 40, respectively. All the results obtained in Fig. 1 mention clearly that the soliton amplification by DRA is the non-adiabatic process without the dependence on l_a . The soliton pulse width, the soliton pulse area, and the

soliton power all appear to evolve in such a way that the soliton pulse does not preserve the hyperbolic-secant shape during the propagation in the span. The changes become more violently with the increase in l_a . Although we can almost achieved the restoration of the soliton power at the end of span by this design, the pulse area, the soliton width, as well as the soliton power, cannot be restored to their original values due to the non-adiabatic amplification. As a result, part of the energy of the soliton pulse transfers into the non-soliton component, or the dispersive wave, during the amplification, and the power of the dispersive wave increases for large l_a according to stronger perturbation. For $l_a = 0.5$, the deviations of pulse area and the pulse width from the origin are below 1%. However, this deviation is cumulative, therefore; the soliton will finally become the dispersive wave for some cascaded spans. This result indicates that the smaller the ratio of l_a is used, the longer the soliton can propagate for the cascaded DRA spans.

Table I: Optimum pump powers for constructing the DRA gain of case (b) on a 40-km span.

l_a	0.5	1	2	8	40
B [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
P_s [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f [mW]	75.00	56.00	51.00	72.00	349.00
P_b [mW]	56.23	85.26	111.07	210.60	611.56

Table II: Optimum pump powers for constructing the DRA gain of case (d) on a 40-km span.

l_a	0.5	1	2	8	40
B [Gbps]	35.25	49.85	70.50	141.00	315.28
P_s [mW]	7.55	15.10	30.21	120.83	604.15
P_f [mW]	58.00	66.00	78.00	147.00	99.00
P_b [mW]	82.98	88.31	110.00	264.86	36.79

In comparison to the results of [4], the work [4] has used their numerical results for classifying the soliton amplification by DRA into the non-adiabatic process, which occurs for $l_a \ll 8$, the resonance at $l_a = 8$, where the variation of the soliton pulse area, power, and width become the most violent, and the adiabatic process occurring for $l_a \gg 8$. However, our results, obtained by solving the DRA equations and the SSFM, which should yield more accurate results than the work [4] because the pump depletion is not neglected, show that the resonance and the adiabatic amplification are no longer existed. According to Fig. 1, although we can observe the fluctuation as large as 50%, 100%, and 50%, respectively for the soliton pulse area, pulse width,

and power at $l_a = 8$ (Fig. 1(c)), at $l_a = 40$ (Fig. 1(d)), where the soliton amplification should be adiabatic with very small fluctuation of these soliton parameters, we can only observe the non-adiabatic evolutions of these soliton parameters with larger fluctuations than at $l_a = 8$. We also explore other cases of design (case (a), case (c), and case (d)). The obtained results also show that the DRA can only result in the non-adiabatic soliton amplification with similar manner to the result of case (b) shown in Fig. 1.

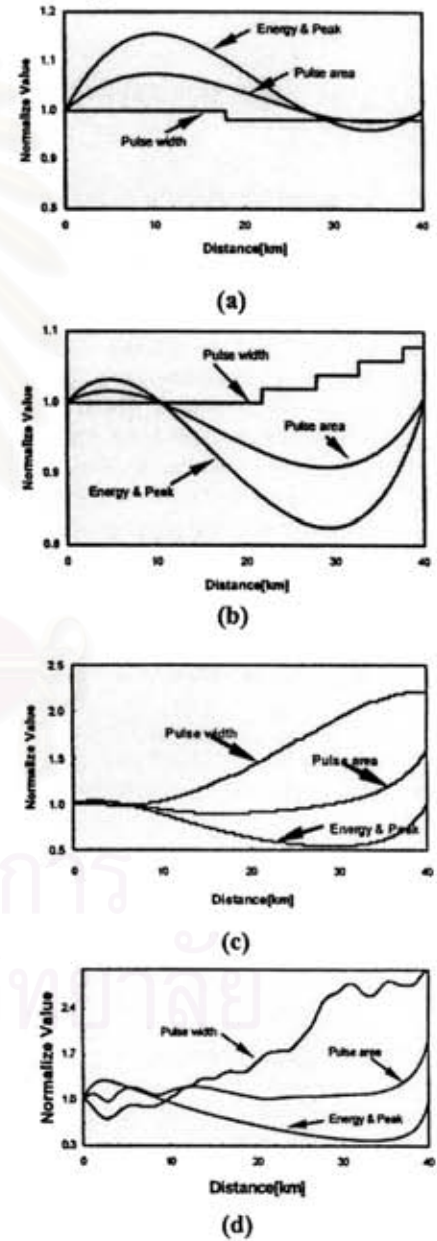


Fig. 1: Evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width and soliton power (energy) for the designed case (b), when (a) $l_a = 0.5$, (b) $l_a = 1$, (c) $l_a = 8$, and (d) $l_a = 40$, respectively

When the soliton amplification by DRA non-adiabatic process, it finally becomes identical to th

soliton amplification using lump amplifiers, such as the EDFAs, where the amount of dispersive wave generated during a span is reduced by employing sufficiently small l_a . However, the advantages of DRA to the lump amplification are the generation of smaller amount by-product ASE noise, which helps reducing the Gordon-Haus effect [2], and the smaller perturbation to the soliton achieving by the distributed gain that yields smaller power fluctuation. Therefore, we can expect for longer amplifier span from the DRA than the lump amplification.

3. COMPUTER SIMULATIONS

To demonstrate the performance of soliton transmission in a chain of DRA chain comparing to the use of lump EDFA, we perform some computer simulations based on the calculation of numerical bit-error rate (BER) of a 128-bit pseudorandom optical soliton signal. The DRA is designed for Case (c), therefore; the power of soliton transmission is almost constant during propagation in DRA span. Figure 2 shows the calculated BER, in logarithmic scale, of the soliton signal as a function of transmission distance for the case of DRA, lump amplification and the ideal soliton in lossless fiber. In all cases, the BER degradation resulted from the ASE noise is almost negligible because the transmission distance is relatively short and all the input power values are high enough for maintaining good OSNR at receiver. The main problems that limit transmission distance of the soliton signal are the soliton interaction [2] and the Gordon-Haus effect.

In Fig. 2, the data rate is 20 Gbps with the duty cycle of 20 %, and $l_a = 1$, which means the soliton period is equal to the amplifier span. In this case, our proposed DRA gives BER that is better than those of lump amplification, but not as good as the ideal soliton. This is because the dispersive wave disperses from the soliton signal owing to $l_a = 1$. However, for lump amplification, larger amount of such dispersive wave is generated because stronger perturbation due to power fluctuation in each span of lump amplification is more severe than the constant power map produced by our designed DRA. Moreover, the amount of ASE noise generated by the lump amplifier is larger than the ASE noise from the DRA. If we define the system limitation at $\text{BER} = 10^{-9}$, the maximum soliton transmission distances for this case are 720, 480, and 1,000 km, for DRA, lump amplification, and ideal soliton, respectively. Comparing to system using lump amplification, further distance about 240 km is achieved by using DRA.

We also explore for the cases of $l_a = 0.2$ and $l_a = 2$. The trend of results is almost similar to Fig. 2. For $l_a = 0.2$, the maximum distance for soliton transmission by the DRA, the lump amplification, and the ideal soliton are 800, 450, and 1,150 km, respectively. On the other hand, For $l_a = 2$, the maximum distance for soliton transmission by the DRA,

the lump amplification, and the ideal soliton are 240, 100, and 360 km, respectively.

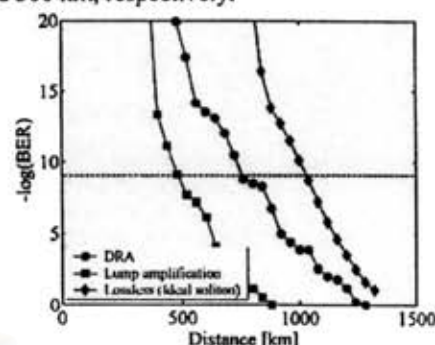


Fig. 2: Numerical BER of the 20-Gbps soliton signal with duty cycle 20 %, and $l_a = 1$.

4. CONCLUSION

In this paper, we have investigated the use of DRA for non-dispersion-managed soliton again by using more accurate method than the work in [4]. Our results predicted that the soliton amplification by DRA is the non-adiabatic process without the existence of the adiabatic and the resonance region as shown before in [4]. As a result, similar to the soliton amplification using the lump amplification, the ratio of the DRA span and the soliton period also places a limit in soliton transmission distance. However, we demonstrated that, at the same ratio of the DRA span and the soliton period, the DRA, which is designed to give soliton constant power during the span, yielded better transmission result than the lump amplification because of smaller perturbation caused by soliton power fluctuation as well as smaller amount of generated ASE noise.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, under the Ratchadaphisek Somphot Endowment.

REFERENCES

- [1] L. F. Mollenauer, S. G. Evangelides Jr., and H. A. Haus, "Long-distance soliton propagation using lumped amplifiers and dispersion shifted fiber," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 194-196, 1991.
- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, New York: Academic Press, 3rd edition, 2001.
- [3] A. Hasegawa, "Numerical study of optical soliton transmission amplified periodically by the stimulated Raman process," *Applied Optics*, vol. 23, no. 19, pp. 3302-3309, 1984.
- [4] L. F. Mollenauer, J. P. Gordon, and M. N. Islam, "Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 1, pp. 157-173, 1986.
- [5] A. Hasegawa, "Soliton-based optical communications: an overview," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1161-1172, 2000.
- [6] M. N. Islam, "Raman amplifiers for telecommunications," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 8, no. 3, pp. 548-559, 2002.
- [7] H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarjaona, "Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 530-532, 1999.

Non-Dispersion-Managed Soliton Amplification Using Distributed Raman Amplification

Pasu Kacwplung Ekachai Kongboonsod, and Preeda Jarupoom
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, THAILAND.
E-mail: Pasu.K@Chula.ac.th

Abstract

Optical soliton, amplified by the distributed Raman amplification (DRA), is numerically studied using more accurate method than previous works. In our work, the DRA gain is actually designed by numerically solving the DRA equations, which include both the pump depletion and the soliton depletion. Our results predict that only the non-adiabatic region exists for the soliton amplification by DRA. The soliton behavior in the chain of DRA is found to be identical to the soliton amplification using the lump optical amplification, where the ratio of the amplifier span and the soliton period plays a dominant role in limiting the transmission distance.

1. Introduction

It has been widely recognized that the constraint of non-dispersion-managed (DM) soliton amplification by lump amplification is that the amplifier span must be chosen at the length much shorter than characteristic length called the soliton period [1], in order to reduce the dispersive wave generated from the soliton due to the perturbation caused by the soliton power fluctuation. This constraint is sometimes very impractical because, for relatively-high data rate, the soliton period may become an unreasonable value such several kilometers.

As an alternative way for non-DM soliton amplification, the distributed Raman amplification (DRA) gain provided by the stimulated Raman scattering in optical fiber [2] can also be applied. The idea of soliton amplification by the DRA was first studied by Hasegawa [3], and then, was further explored in details by Mollenauer et al. [4]. However, the concept of all-optical transmission using the DRA gave its position to the lump optical amplification based on the Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) during the 1990s because no high-power pump laser available in that decade, and also the discovery of the DM soliton [5] that can partly overcome the constraint of amplification. Since it becomes possible to realize the high-power semiconductor lasers for DRA nowadays. Moreover, the DRA offers several

advantages to EDFA, such as wider amplification bandwidth, higher optical-signal-to-noise-ratio (OSNR), this DRA using transmission fiber now is currently attracting interest again [6].

In the study [4] of non-DM soliton amplification by DRA, Mollenauer et. al. introduced the use of pulse area for examining the amount of dispersive wave radiated from soliton in the link of DRA for several ratios of the DRA span: L_a , and the soliton period:

Z_0 . They pointed out that the pulse behavior can be classified into three principle regions: (1) $L_a \gg 8Z_0$, where they called "adiabatic region" because the pulse keeps its hyperbolic-secant shape during the propagation, (2) $L_a = 8Z_0$, where they called "resonance" because the pulse area, the soliton width, and the soliton power undergo wild fluctuations, and (3) $L_a \ll 8Z_0$, where they called "non-adiabatic region" because the pulse changes its shape without conserving the soliton properties. However, it becomes the nearly the soliton again at the end of span as long as the ratio between L_a and Z_0 is small enough.

In fact, the works [3] and [4] have not yet taken into account the pump depletion when the pumps transfer their powers to soliton pulses. Moreover, the soliton power was assumed to be constant. This is not quite good assumption for real DRA. For designing the DRA for soliton amplification, in fact, it is necessary to numerically solve the 4-coupled DRA equations governing for forward pump, backward pump, soliton, and amplifier noise evolutions, to obtain the actual pump powers. Moreover, Hasegawa and Mollenauer only designed the DRA gain to completely cancel for the fiber loss in amplifier span. In their schemes, the soliton power at the output end of span becomes equal to that of the input, while the soliton may experience the severe change in pulse area during the span. There still exists several other designs of the distributed gain offered by the DRA should give significantly better result than their works.

In this paper, again, we study the soliton amplification by DRA, but with more accurate method than [3] and [4]. In our work, the DRA gain is actually designed by numerically solving the DRA equations, which include both the pump and the soliton depletions. These two effects are very important and they have been neglected in previous studies. Our results newly show that only the non-adiabatic region exists for the soliton amplification by DRA, independently on how much L_a/Z_0 is. Then, the soliton behavior in the chain of DRA is identical to the soliton amplification using the lump amplification, in which the requirement of $L_a/Z_0 < 1$ plays a dominant role in limiting the span length. However, at the same ratio of L_a/Z_0 , the DRA will give better transmission result than the lump optical amplification because of smaller perturbation caused by soliton power fluctuation, as well as smaller amount of generated amplifier noise.

2. Observation of Only Non-adiabatic Soliton Amplification by DRA

Raman gain in optical fiber arises from the transfer of power from one optical beam to another that is down shifted in frequency by the energy of an optical phonon [2]. Practically this can be implemented by inject high power laser pump whose frequency is higher than the signal carrier frequency by an amount of Raman frequency shift (13 THz) into a transmission fiber [2]. The Raman gain exhibits the gain over a large bandwidth up to 40 THz.

For the actual design of the DRA gain, it is necessary to use the 4-coupled DRA equations [7], which govern for the evolutions of the forward pump, the backward pump, the signal, and the generated noise. In our work, 4 interesting cases of design are studied: (a) the design for obtaining the soliton power at the end of the DRA span identical to that of the input as much as possible, (b) the design for preserving the soliton power along the propagation in the DRA span, (c) the design for obtaining the soliton pulse area at the end of the DRA span identical to that of the input as much as possible, and (d) the design for obtaining almost constant pulse area during the propagation in the DRA span. It should be noted that the case (a) is the common design for DRA for justly compensating for the fiber loss in the span. The works [3] and [4] also design the DRA gain following the case (a), however, without using the exact DRA equations.

From the DRA equations, since the signal power evolution in the bi-directional pumping DRA depends

on the pump powers launched into the fiber, the target distributed gain in the DRA link can be designed by only using appropriate pump powers. To obtain those powers, we numerically solve the 4-coupled DRA equations using the 4th-order Runge-Kutta method (RK4) for single-wavelength pumping. In our calculation, Raman gain spectrum with polarization factor of 2, and attenuation spectrum of silica fiber shown in [2] is taken. For a given input signal power, to obtain the target gain, the DRA equations are solved iteratively until we obtain the optimal bi-directional input pump powers which yield the least normalized root-mean-squared error between the target gain and the constructed gain.

For the design that requires the information of soliton evolution during the propagation in the span (case (b) and (d)), the optical soliton propagation is simulated by solving the nonlinear Schrodinger equation (NLSE) with the split-step Fourier method (SSFM) [2]. The calculation step is always chosen at a value that gives the step error less than 0.01 %. To simulate signal propagation in DRA, the distributed gain for each integration step of the SSFM is calculated from the DRA equations, then, the distributed gain is acted as a gain/loss in the NLSE for that step. Similarly, the amount of noise generated within the step length of DRA is also computed, then, is used for calculating of Gaussian distribution of noise. The noise will be randomly added to the signal bandwidth at end of that step. The dispersion-shifted fiber (DSF) is used for soliton transmission. The attenuation for soliton wavelength is assumed to be 0.2 dB/km, the dispersion value is -1 ps/km/nm, and the nonlinear coefficient is $2.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. The most important quantity in this work is the ratio between L_a and Z_0 . We define this parameter as the normalized amplifier span l_a .

For the optimal input forward (P_f) and backward (P_b) pump powers, at a given L_a , P_f and P_b appear to increase with their corresponding soliton powers P_s . Similarly, P_f and P_b also become high values when we increases L_a at a given P_s . Furthermore, the root-mean-squared deviation of the constructed gain from the target gain increases with P_s and L_a . The summary of the optimal P_f and P_b as a function of P_s and L_a does not appear here because of limited space.

Focusing on the case (a) in order to compare our result with the work [4], Fig. 1(a)-(d) show the

evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width, and soliton power (energy) for $l_a = 0.5, 1, 8,$ and $40,$ respectively. It should be noted that $l_a \leq 1, l_a = 8,$ and $8 \leq l_a \leq 40$ are corresponding for the non-adiabatic, resonance, and the adiabatic soliton amplifying regions predicted by [4], respectively. All the results obtained in Fig. 1 mention clearly that the soliton amplification by DRA is the non-adiabatic process without the dependence on l_a . The soliton pulse width, the soliton pulse area, and the soliton power all appear to evolve in such a way that the soliton pulse does not preserve the hyperbolic-secant shape during the propagation in the span. The changes become more violently with the increase in l_a . Although we can almost achieved the restoration of the soliton power at the end of span by this design, the pulse area, the soliton width, as well as the soliton power, cannot be restored to their original values due to the non-adiabatic amplification. As a result, part of the energy of the soliton pulse transfers into the non-soliton component, or the dispersive wave, during the amplification, and the power of the dispersive wave increases for large l_a according to stronger perturbation. For $l_a = 0.5,$ the deviations of pulse area and the pulse width from the origin are below 1%. However, this deviation is cumulative, therefore; the soliton will finally become the dispersive wave for some cascaded spans. This result indicates that the smaller the ratio of l_a is used, the longer the soliton can propagate for the cascaded DRA spans.

In comparison to the results of [4], the work [4] has used their numerical results for classifying the soliton amplification by DRA into the non-adiabatic process, which occurs for $l_a \ll 8,$ the resonance at $l_a = 8,$ where the variation of the soliton pulse area, power, and width become the most violent, and the adiabatic process occurring for $l_a \gg 8.$ However, our results, obtained by solving the DRA equations and the SSFM, which should yield more accurate results than the work [4] because the pump depletion is not neglected, show that the resonance and the adiabatic amplification are no longer existed. According to Fig. 1, although we can observe the fluctuation as large as 50%, 100%, and 50%, respectively for the soliton pulse area, pulse width, and power at $l_a = 8$ (Fig. 1(c)), at $l_a = 40$ (Fig. 1(d)), where the soliton amplification should be adiabatic with very small fluctuation of these soliton parameters, we can only observe the non-adiabatic

evolutions of these soliton parameters with larger fluctuations than at $l_a = 8.$

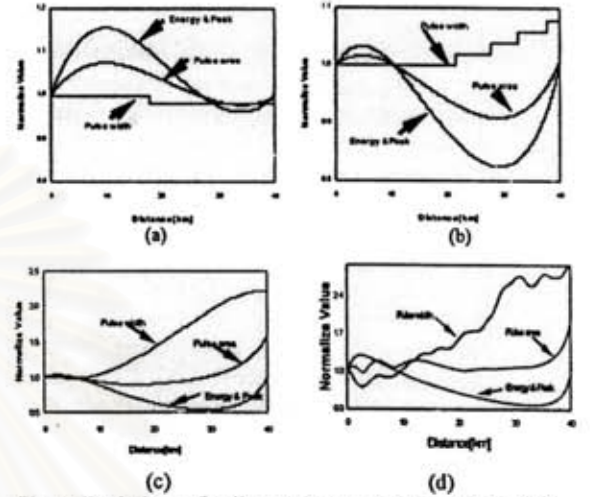


Fig. 1: Evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width, and soliton power (energy) for the designed case (a), when (a) $l_a = 0.5,$ (b) $l_a = 1,$ (c) $l_a = 8,$ and (d) $l_a = 40,$ respectively.

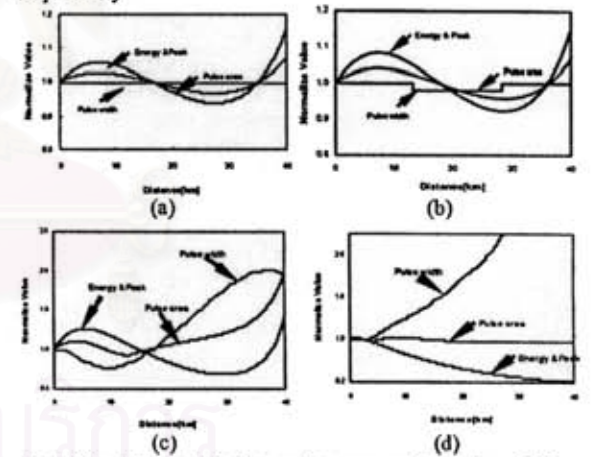


Fig. 2: Evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width, and soliton power (energy) for the designed case (b), when (a) $l_a = 0.5,$ (b) $l_a = 1,$ (c) $l_a = 8,$ and (d) $l_a = 40,$ respectively.

We also explore other cases of design (case (b), case (c), and case (d)). The evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width, and soliton power (energy) at the same l_a as Fig. 1 for the case (b), case (c), and case (d) are shown in Fig. 2, 3, and 4, respectively. The obtained results emphasize that the soliton amplification by the DRA can only result in the non-adiabatic soliton amplification.

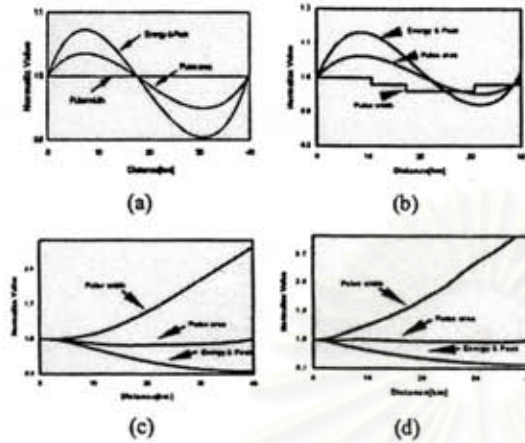


Fig. 3: Evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width, and soliton power (energy) for the designed case (c), when (a) $L_a = 0.5$, (b) $L_a = 1$, (c) $L_a = 8$, and (d) $L_a = 40$, respectively.

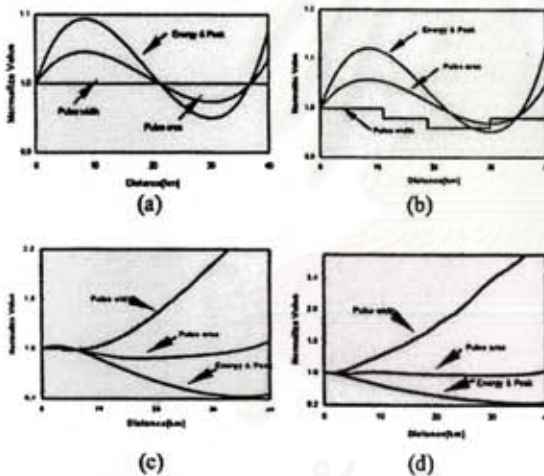


Fig. 4: Evolutions of soliton pulse area, soliton pulse width, and soliton power (energy) for the designed case (d), when (a) $L_a = 0.5$, (b) $L_a = 1$, (c) $L_a = 8$, and (d) $L_a = 40$, respectively.

When the soliton amplification by DRA is non-adiabatic process, it finally becomes identical to the soliton amplification using the lump optical amplifiers, where the amount of dispersive wave generated during a span is reduced by employing sufficiently small L_a . However, the advantages of DRA to the lump optical amplification are the generation of smaller amount by-product ASE noise, which helps reducing the Gordon-Haus effect [2], and the smaller perturbation to the soliton achieving by the distributed gain that yields

smaller power fluctuation. Therefore, we can expect for longer amplifier span from the DRA than the lump amplification.

3. Conclusion

In this paper, we have investigated the use of DRA for non-dispersion-managed soliton again by using more accurate method than the work in [4]. Our results predicted that the soliton amplification by DRA is the non-adiabatic process without the existence of the adiabatic and the resonance region as shown before in [4]. As a result, similar to the soliton amplification using the lump optical amplification, the ratio of the DRA span and the soliton period also places a limit in soliton transmission distance. However, at the same ratio of the DRA span and the soliton period, the DRA should yield better transmission result than the lump amplification because of smaller perturbation caused by soliton power fluctuation as well as smaller amount of generated ASE noise.

4. Acknowledgement

This work is supported by the Ratchadapisek Somphot Endowment, Chulalongkorn University, Thailand.

5. References

- [1] L. F. Mollenauer, et al., "Long-distance soliton propagation using lumped amplifiers and dispersion shifted fiber," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 194-196, 1991.
- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, New York: Academic Press, 3rd edition, 2001.
- [3] A. Hasegawa, "Numerical study of optical soliton transmission amplified periodically by the stimulated Raman process," *Applied Optics*, vol. 23, no. 19, pp. 3302-3309, 1984.
- [4] L. F. Mollenauer, et al., "Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 1, pp. 157-173, 1986.
- [5] A. Hasegawa, "Soliton-based optical communications: an overview," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1161-1172, 2000.
- [6] M. N. Islam, "Raman amplifiers for telecommunications," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 8, no. 3, pp. 548-559, 2002.
- [7] H. Kidorf, K. Rottwitz, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarjaona, "Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 530-532, 1999.