

การหาค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดีสเพอร์ชัน

นางสาวชนิดา ไทวราภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF PATH-AVERAGED PEAK POWER
CONSIDERING DISPERSION EFFECT

Miss.Chanida Thovarabha

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500384

ชนิดา ไทวราภา : การหาค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชัน.
(DETERMINATION OF PATH-AVERAGED PEAK POWER CONSIDERING DISPERSION
EFFECT) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 98 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันเป็นครั้งแรก เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การสื่อสารสัญญาณทางแสงในเชิงทฤษฎีให้ได้ผลถูกต้องแม่นยำกว่าเดิมซึ่งใช้ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเพียงผลของการลดทอนของกำลังสัญญาณเท่านั้น ในการหาค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันนั้น ในขั้นแรกจะวิเคราะห์ในกรณีที่ทำกรสื่อสารสัญญาณเพียงบิตเดียว ความถูกต้องแม่นยำของค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยที่ได้คิดค้นขึ้นนี้ ถูกพิสูจน์โดยการจำลองการสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ Differential phase-shift keying ที่อัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps ในเส้นใยแสง ทั้งในระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชัน (Dispersion management) และระบบที่ใช้วิธีคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ (Optical phase conjugation) จากการเปรียบเทียบผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสื่อสารสัญญาณในแบบดังกล่าวเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยแบบเดิมที่คิดเพียงผลของการลดทอนของกำลังสัญญาณเพียงอย่างเดียว และค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยแบบใหม่ที่นำเสนอในการคำนวณ พบว่าผลการจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสโดยใช้ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันมากกว่าการใช้ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยแบบเดิมที่คิดผลของการลดทอนของสัญญาณเพียงอย่างเดียว

จากนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประมาณค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่ใช้หลายบิตในการสื่อสารสัญญาณ ทั้งในระบบที่ทำการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคและในระบบที่ทำการมอดูเลตทางความเข้มแสง ในการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่ใช้หลายบิตในการสื่อสารสัญญาณนั้นพบว่ามีค่าประมาณ 0.57 เท่าของค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยในกรณีที่ทำกรสื่อสารสัญญาณเพียงบิตเดียว ส่วนการมอดูเลตทางความเข้มแสงค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่ใช้หลายบิตในการสื่อสารสัญญาณพบว่ามีค่าประมาณ 0.51 เท่าของค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยในกรณีที่ทำกรสื่อสารสัญญาณเพียงบิตเดียว

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....ชนิดา ไทวราภ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

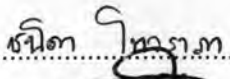

4970271121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTICAL FIBER TRANSMISSION / PHASE-SHIFT-KEYED TRANSMISSION / PATH-AVERAGED POWER APPROXIMATION / DISPERSION COMPENSATION / OPTICAL PHASE CONJUGATION

CHANIDA THOVARABHA : DETERMINATION OF PATH-AVERAGED PEAK POWER CONSIDERING DISPERSION EFFECT. THESIS ADVISOR : PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 98 pp.

In this thesis proposes a path-averaged peak power considering dispersion effect of optical fiber for the first time in our knowledge, in order to attain the results of the theoretical analysis of optical fiber transmission more accurately than the conventional path-averaged power which considers only the fiber attenuation. To calculate the path-averaged peak power considering dispersion effect, in first step, we will analyze in single pulse transmission system. The ultimate accuracy of the newly developed path-averaged peak power is verified by computer simulations based on the transmission of differential phase-shift keying (DPSK) signal with data rates of 5 Gbps and 40 Gbps, in both transmission systems using the dispersion management and the optical phase conjugation. The numerical simulation results are in better agreement with the frequency response analysis of the phase error using the path-averaged peak power considering dispersion effect comparing to the phase error analysis obtained by using the conventional path-averaged peak power that considers only the fiber attenuation.

Then, this thesis approximates a path-averaged peak power considering dispersion effect of optical fiber for multiple bit transmission system in both DPSK modulation system and on-off keying (OOK) modulation system. For DPSK modulation system, the path-averaged peak power considering dispersion effect for multiple bit transmission system is found to be about 0.57 time of the path-averaged peak power considering dispersion effect for single bit transmission. On the other hand for OOK modulation system, the path-averaged peak power considering dispersion effect for multiple bit transmission system becomes about 0.51 time of the path-averaged peak power considering dispersion effect for single bit transmission.

Department	Electrical Engineering	Student's signature..... 
Field of study	Electrical Engineering	Advisor's signature..... 
Academic year	2007	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษ์บุตร, รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ ที่ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์ และสถานที่ใช้ทำวิจัย

ขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนา (Cooperation Project between department of electrical engineering and private sector research and development) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี (2549-2550) และทุนสนับสนุนการวิจัยจากบัณฑิตศึกษา

ขอบคุณและขอบใจ พี่ เพื่อน และน้องที่ทำงานร่วมกันในห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ชั้น 13 ทุกคน ที่คอยถามไถ่ด้วยความห่วงใยว่าเมื่อไหร่จะสำเร็จการศึกษา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย...	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...	จ
กิตติกรรมประกาศ ...	ฉ
สารบัญ ...	ช
สารบัญตาราง ...	ญ
สารบัญภาพ ...	ฎ
บทที่	
1. บทนำ ...	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ...	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ...	9
1.3 ขอบเขตของการวิจัย ...	9
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ...	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ...	11
2. ทฤษฎีการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงพื้นฐาน ...	12
2.1 ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ...	12
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง ...	14
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรูปร่างและกำลังของสัญญาณ ...	15
2.3.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (Fiber attenuation loss) ...	15
2.3.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion) ...	17
2.3.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity) ...	19
2.3.3.1 Self-phase modulation (SPM) ...	20
2.3.3.2 Cross-phase modulation (XPM) ...	21
2.3.3.3 Four-wave mixing (FWM) ...	23
2.4 การมอดูเลตสัญญาณทางแสง (Optical modulation) ...	24
2.4.1 การมอดูเลตทางความเข้มแสง ...	24
2.4.2 การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ...	25
2.4.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างการมอดูเลตความเข้มแสงและ การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ...	26

บทที่	หน้า
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชัน (Dispersion management)	27
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ (Optical phase conjugation for long-haul transmission)	29
2.7 อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในเส้นใยแสง (Optical Fiber Amplifier)	32
2.8 ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง (Path-averaged power)	36
3. การวิเคราะห์ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่ส่งสัญญาณเพียงบิตเดียว	38
3.1 การหาค่ากำลังสัญญาณ	38
3.2 การหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง	39
3.2.1 ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชันทุกช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ	41
3.2.2 ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่ไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชันทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ	42
3.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสในระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค	44
3.4 การเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสที่คำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเพียงผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว กับที่คำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณสูงสุดแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชัน	45
4. แบบจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงที่มีการมอดูเลตดีพีเอสเค	53
4.1 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ	54
4.2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์	55
4.3 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ	57

บทที่	หน้า
4.4 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ ดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบและการ วิเคราะห์ผลลัพธ์	58
5. การวิเคราะห์ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันใน กรณีที่ทำกรสื่อสารสัญญาณหลายบิต	63
5.1 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต แบบดีพีเอสเคเพื่อใช้ในการวิเคราะห์กำลังสัญญาณเฉลี่ย	63
5.2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบ ดีพีเอสเคและการวิเคราะห์ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ย	64
5.3 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลต ทางความเข้มแสงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์กำลังสัญญาณเฉลี่ย	73
5.4 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตทาง ความเข้มแสงและการวิเคราะห์กำลังสัญญาณเฉลี่ย	74
5.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสที่คำนวณด้วยค่ากำลัง สัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีที่ส่ง สัญญาณหลายบิต	84
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	87
6.1 บทสรุป	87
6.2 ข้อเสนอแนะ	88
รายการอ้างอิง	89
ภาคผนวก	92
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	98

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	Q-factor ที่ $P_0 = 1 \text{ mW}, 3 \text{ mW}, 5 \text{ mW}$ และ 7 mW ของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ.....	55
ตารางที่ 4.2	Q-factor ที่ $P_0 = 1 \text{ mW}, 3 \text{ mW}, 5 \text{ mW}$ และ 7 mW ของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ.....	58
ตารางที่ 5.1	ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยและอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิต กับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณ ในระบบที่มีการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น $1 \text{ mW}, 3 \text{ mW}, 5 \text{ mW}$ และ 7 mW ระยะการสื่อสารสัญญาณ คือ 50 km	66
ตารางที่ 5.2	ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยและอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิตกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณ ในระบบที่มีการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ที่ระยะการสื่อสารสัญญาณเป็น $20 \text{ km}, 40 \text{ km}, 60 \text{ km}, 80 \text{ km}$ และ 100 km กำลังสัญญาณขาเข้า คือ 3 mW	70
ตารางที่ 5.3	ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยและอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิตกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณ ในระบบที่ทำการมอดูเลตทางความเข้มแสง ที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น $1 \text{ mW}, 3 \text{ mW}, 5 \text{ mW}$ และ 7 mW ระยะการสื่อสารสัญญาณ คือ 50 km	76
ตารางที่ 5.4	ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยและอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิตกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณ ในระบบที่มีการมอดูเลตทางความเข้มแสง ที่ระยะการสื่อสารสัญญาณเป็น $20 \text{ km}, 40 \text{ km}, 60 \text{ km}, 80 \text{ km}$ และ 100 km กำลังสัญญาณขาเข้า คือ 3 mW	80

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง.....	13
รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล.....	14
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนกำลังสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่นของสัญญาณ.....	16
รูปที่ 2.4 ผลของดิสเพอร์ชันต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง.....	17
รูปที่ 2.5 การแจกแจงของความเร็วกลุ่มและ GVD เทียบกับความยาวคลื่น.....	18
รูปที่ 2.6 การแสดงการเกิด Inter-symbol interference.....	19
รูปที่ 2.7 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง ทาง (a) ความถี่ (b) สเปกตรัมสัญญาณ.....	21
รูปที่ 2.8 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง.....	22
รูปที่ 2.9 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง.....	23
รูปที่ 2.10 การมอดูเลตสัญญาณทางความเข้มแสง.....	25
รูปที่ 2.11 การมอดูเลตสัญญาณแบบดีพีเอสเค.....	25
รูปที่ 2.12 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน.....	27
รูปที่ 2.13 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ.....	28
รูปที่ 2.14 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่มีการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณไว้ที่กึ่งกลางระบบ.....	29
รูปที่ 2.15 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium.....	30
รูปที่ 2.16 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ.....	31
รูปที่ 2.17 ลักษณะการต่อใช้งานของ EDFA.....	33
รูปที่ 2.18 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกำลังของสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้ EDFA เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ.....	34
รูปที่ 2.19 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกำลังของสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้ DRA เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณ.....	34
รูปที่ 2.20 ลักษณะการต่อใช้งานของ DRA.....	35

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายของ DRA กับความต่างระหว่างความยาวคลื่นของสัญญาณกระตุ้นกับความยาวคลื่นของสัญญาณข้อมูล.....	36
รูปที่ 2.22 กำลังสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในระบบสื่อสารทางแสงที่วางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงเป็นรายคาบ.....	37
รูปที่ 3.1 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง โดย (a) ได้รับผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว (b) ได้รับผลจากทั้งการลดทอนของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชันในระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชันทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (c) ได้รับผลจากทั้งการลดทอนของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชันในระบบที่ไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชันทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ และ (d) กำลังสัญญาณทั้ง 3 แบบ ในแกนเดียวกัน.....	40
รูปที่ 3.2 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงที่ได้รับผลจากทั้งการลดทอนของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชันในระบบที่ไม่ได้ทำการชดเชยดิสเพอร์ชันทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ พร้อมสมการแสดงกำลังของสัญญาณ.....	42
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟส.....	46
รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที่มี $P_0 = 1 \text{ mW}$	47
รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที่มี $P_0 = 3 \text{ mW}$	48
รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที่มี $P_0 = 5 \text{ mW}$	49
รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที่มี $P_0 = 7 \text{ mW}$	50
รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค Return-to-Zero (RZ-DPSK) ในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ.....	54
รูปที่ 4.2 Eye diagram ของสัญญาณ RZ-DPSK อัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps ที่ 5,000 km ของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ (a) $P_0 = 1 \text{ mW}$, (b) $P_0 = 3 \text{ mW}$, (c) $P_0 = 5 \text{ mW}$ และ (d) $P_0 = 7 \text{ mW}$	56

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค Return-to-Zero (RZ-DPSK) ในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ.....	57
รูปที่ 4.4 Eye diagram ของสัญญาณ RZ-DPSK อัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps ที่ 5,000 km ของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ (a) $P_0 = 1$ mW, (b) $P_0 = 3$ mW, (c) $P_0 = 5$ mW และ (d) $P_0 = 7$ mW.....	59
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบกับระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 3 mW.....	61
รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค.....	63
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เดินทางในระบบที่มีการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคกับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ที่กำลังสัญญาณขาเข้า 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW ระยะในการสื่อสารสัญญาณ คือ 50 km.....	67
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิตกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณ กับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ในระบบที่ทำการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค ที่กำลังสัญญาณขาเข้า 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW.....	68
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เดินทางในระบบที่มีการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคกับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ที่ระยะในการสื่อสารสัญญาณเป็น 20 km, 40 km, 60 km, 80 km และ 100 km กำลังสัญญาณขาเข้า คือ 3 mW.....	71
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิตกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณกับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ในระบบที่ทำการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคที่ระยะในการสื่อสารสัญญาณเป็น 20 km, 40 km, 60 km, 80 km และ 100 km.....	72
รูปที่ 5.6 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตทางความเข้มแสง.....	74

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เดินทางในระบบที่ทำการมอดูเลตทางความเข้มแสงกับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ที่กำลังสัญญาณขาเข้า 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW ระยะในการสื่อสารสัญญาณคือ 50 km.....	77
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิตกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณ กับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ในระบบที่ทำการมอดูเลตทางความเข้มแสง ที่กำลังสัญญาณขาเข้า 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW.....	78
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เดินทางในระบบที่มีการมอดูเลตทางความเข้มแสงกับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ที่ระยะในการสื่อสารสัญญาณเป็น 20 km, 40 km, 60 km, 80 km และ 100 km กำลังสัญญาณขาเข้า คือ 3 mW.....	81
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิตกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยของระบบที่ใช้เพียงหนึ่งบิตในการสื่อสารสัญญาณกับจำนวนบิตที่เปลี่ยนแปลง ในระบบที่ทำการมอดูเลตทางความเข้มแสงที่ระยะในการสื่อสารสัญญาณเป็น 20 km, 40 km, 60 km, 80 km และ 100 km.....	82
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที่มี $P_0 = 1$ mW ที่คำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิต.....	84
รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที่มี $P_0 = 3$ mW ที่คำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิต.....	85
รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที่มี $P_0 = 5$ mW ที่คำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีทำการสื่อสารสัญญาณหลายบิต.....	85

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่
 เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ในกรณีที $P_0 = 7$ mW ที่คำนวณด้วยค่ากำลัง
 สัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันในกรณีทีทำการสื่อ
 สัญญาณหลายบิต.....