บทที่ 1

บทนำ

การออกแบบระบบสื่อสัญญาณให้ได้อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดในระยะทางที่กำหนดเป็นเป้าหมายที่คาดหวัง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบและอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ โดยการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้อยู่เดิมซึ่งไม่สามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้ได้แล้ว ทั้งในเรื่องของอัตราเร็วในการส่งสัญญาณ ระยะทางในการส่งสัญญาณ ราคา หรือจะเป็นความยากง่ายในการติดตั้ง แต่อย่างไรก็ดี ในด้านของการวิเคราะห์ระบบที่ได้ทำการพัฒนานั้นจำเป็นต้องใช้ค่าในการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นด้วย เพราะถึงแม้ระบบจะได้รับการพัฒนาไปมาก แต่ค่าการวิเคราะห์ไม่สอดคล้องและส่งเสริมผลของระบบที่ทำการวิเคราะห์ อาจจะทำให้เกิดความสับสนว่าระบบที่เลือกใช้หรือพัฒนาขึ้นนั้นดีกว่าที่มีอยู่เดิมหรือไม่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอค่าที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบเพื่อความถูกต้องแม่นยำ โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตการติดต่อสื่อสารจะอยู่ในรูปแบบของการส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านสายสัญญาณที่ใช้โลหะเป็นตัวนำสัญญาณ (Conductive metal) เช่น เส้นทองแดงชนิดสายคู่พันเกลียว (Twisted pair) และสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial cable) ซึ่งสัญญาณที่วิ่งอยู่ภายในสายที่มีตัวนำเป็นโลหะนั้น อาจจะถูกรบกวนได้โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งต่างๆ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ที่ผลิตสนามแม่เหล็ก หรือแม้กระทั่งปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เป็นต้น และการเดินสายเป็นระยะทางไกลมากๆ เช่น การเดินสายระหว่างประเทศจะมีการสูญเสียของกำลังสัญญาณเกิดขึ้น จึงต้องใช้อุปกรณ์สำหรับทวนสัญญาณติดเป็นจำนวนมาก ซึ่งในปัจจุบันปริมาณการส่งข้อมูล (Data traffic) มีการเพิ่มมากขึ้นตามการพัฒนาของเทคโนโลยี ส่งผลให้การสื่อสารในรูปแบบเดิมมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นนี้ได้ ดังนั้นการสื่อสารทางแสง (Optical communication) ที่ใช้สายสัญญาณแบบใหม่ซึ่งใช้ตัวนำที่ไม่ได้เป็นโลหะที่เรียกว่าเส้นใยแสง (Optical fiber) จึงเข้ามามีบทบาทในการส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก เนื่องจากคุณสมบัติของการสื่อสารทางแสงที่มีแบนด์วิดท์ที่สูงมาก อีกทั้งยังส่งข้อมูลได้ระยะ

ทางไกลมากขึ้นด้วย จากเหตุผลดังกล่าวทำให้การสื่อสารทางแสงสามารถรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ดีกว่าการสื่อสารรูปแบบอื่น

เส้นใยแสงเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพมากในการส่งผ่านสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางที่ใช้ส่งสัญญาณต่างๆ จะพบว่าเส้นใยแสงมีข้อดีมากมาย [1] เช่น

(1) เส้นใยแสงมีอัตราการสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแสงต่ำ ทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกลกว่าและใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณรวมทั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณน้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่น

(2) เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สามารถติดตั้งได้ง่าย และจากการที่มีขนาดเล็กจึงสามารถรวมเส้นใยแสงหลายเส้นเข้าด้วยกันเป็นสายเคเบิลทำให้ได้จำนวนเส้นที่มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้มากขึ้นจากการใช้พื้นที่เท่าเดิม

(3) เส้นใยแสงถูกผลิตมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า จึงปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้มีความถูกต้องของสัญญาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสื่อประเภทอื่น ข่าวสารที่ส่งไปกับแสงจะมีตำแหน่งรับและส่งที่แน่นอน ดังนั้นการแอบลักลอบใช้สัญญาณทางแสงเพื่อดักฟังจึงไม่สามารถกระทำได้

(4) เส้นใยแสงทำจากวัสดุที่ไม่มีการเจือจางและการออกแบบสายเคเบิลของเส้นใยแสงมีความต้านทานต่อทั้งอุณหภูมิและความชื้น ทำให้สามารถนำเส้นใยแสงไปใช้ใต้น้ำได้ นอกจากนั้นเส้นใยแสงยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งเส้นใยแสงบางเส้นมีอายุการใช้งานประมาณ 40 ปี อีกทั้งยังต้องการการบำรุงรักษาที่น้อยมาก

นับตั้งแต่ปี 1983 เส้นใยแสงที่ใช้กันโดยทั่วไปจะเป็นเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (Single mode fiber: SMF) เส้นใยแสงแบบนี้มีความเหมาะสมที่จะทำงานที่ความยาวคลื่น 1310 nm ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ แต่มีค่าการลดทอนของกำลังสัญญาณค่อนข้างสูง จึงต้องใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการสร้างสัญญาณใหม่จากสัญญาณที่ได้รับเข้ามาซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้รับผลจากการลดทอนของกำลังสัญญาณในเส้นใยแสงแล้ว ให้กลับเป็นเหมือนสัญญาณเดิมที่ส่งมาจากต้นทาง ดังนั้นจึงยังทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของแบนด์วิดท์อยู่ เนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนไปมาระหว่างสัญญาณแสงและสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งการสื่อสารทางไฟฟ้าจะมีอัตราเร็วในการส่งผ่านข้อมูลที่น้อยกว่าการสื่อสารทางแสง ทำให้อัตราเร็วในการส่งผ่านข้อมูลของระบบลดลง ต่อมาในช่วงทศวรรษ 1990 ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เรียกว่า Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) อุปกรณ์นี้สามารถช่วยเพิ่มความจุของการส่งข้อมูลทางเส้นใยแสงได้ และมีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการแบบเดิมที่ต้องมีการเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและให้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นมาใหม่แล้วจึงเปลี่ยนกลับมาเป็นสัญญาณแสงตามเดิม ซึ่งวิธีการแบบเดิมนี้ต้องออกแบบให้ใช้กับวิธีการเข้ารหัสและอัตราเร็วบิต (Bit rate) เฉพาะอย่าง แต่ถ้าใช้ EDFA นั้น จะขยายสัญญาณแสงได้โดยตรง โดยไม่ต้องคำนึงถึงโครงสร้าง

หรืออัตราเร็วบิตของสัญญาณเลย อีกทั้งยังสามารถขยายสัญญาณทางแสงได้พร้อมกันหลายความถี่ ทำให้สามารถส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่นหลายค่าได้พร้อมกัน เป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นเป็นหลายเท่า

ต่อมาได้มีการพัฒนา Dispersion-shifted fiber (DSF) [2] ขึ้น ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชั่นใกล้ศูนย์ที่แถบความยาวคลื่น 1550 nm และให้การลดทอนของกำลังสัญญาณต่ำกว่าการลดทอนของกำลังสัญญาณในแถบความยาวคลื่น 1310 nm ของ SMF ทำให้เส้นใยแสงชนิด DSF ดูเหมาะสมที่จะใช้กับการใช้งานในระยะทางไกลและมีอัตราเร็วของการส่งข้อมูลสูง แต่อย่างไรก็ตาม กำลังสัญญาณขาออก (Output power) ที่เพิ่มขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง รวมทั้งการส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นพร้อมกันได้ ทำให้สัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงได้รับผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ปรากฏการณ์เคอร์เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสง จากการที่ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแสงแปรไปตามกำลังของสัญญาณ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งที่จำกัดประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของเส้นใยแสง ปรากฏการณ์เคอร์ดังกล่าวนี้ ได้แก่ Self-phase modulation (SPM), Cross-phase modulation (XPM) และ Four-wave mixing (FWM) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการ FWM นี้จะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ ซึ่งขัดแย้งโดยตรงกับความต้องการที่จะให้ค่าดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงมีค่าน้อยสุดเพื่อให้ส่งข้อมูลได้มากและไปได้ไกล เนื่องจากเส้นใยแสงชนิด DSF จะมีความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์อยู่ภายในแถบความยาวคลื่นที่ใช้งานของ EDFA ดังนั้นความต้องการที่ขัดแย้งกันเหล่านี้จะจำกัดความสามารถของเส้นใยแสงชนิด DSF ที่จะใช้ในเครือข่ายการส่งข้อมูลความเร็วสูงในระบบระยะทางไกลและระบบระยะทางไกลยิ่ง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเส้นใยแสงแบบใหม่ขึ้นมาเรียกว่า Non-zero dispersion-shifted fiber (NZ-DSF) [2] ซึ่งเป็นเส้นใยแสงที่มีการเลื่อนความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นศูนย์ออกไปอยู่ภายนอกแถบความยาวคลื่นการใช้งานของ EDFA เป็นการทำให้มีดิสเพอร์ชั่นส่วนหนึ่งที่ควบคุมได้เกิดขึ้นในระบบและยังลดผลจาก FWM ได้

เนื่องจากฐานการติดตั้งใช้งานที่มีอยู่มากแล้วของเส้นใยแสงชนิด SMF การจะเปลี่ยนไปใช้เส้นใยแสงชนิดอื่นเป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นการที่จะใช้เส้นใยแสงชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพในระบบสื่อสัญญาณที่มีการขยายสัญญาณแสงด้วย จำเป็นต้องมีการลดค่าดิสเพอร์ชั่นที่สะสมขึ้นอันเป็นผลจากการใช้งานที่ 1550 nm ที่ระยะทางไกล เส้นใยแสงชนิด Dispersion compensating fiber (DCF) [2] ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อชดเชยดิสเพอร์ชั่นที่เกิดขึ้นดังกล่าว ตามปกติเส้นใยแสง SMF จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นประมาณ +17 ps/nm/km ที่ความยาวคลื่น 1550 nm ถึงแม้ว่าค่าดิสเพอร์ชั่นที่สูงขนาดนี้จะลดปัญหาของ FWM ไปได้ แต่ระยะทางการส่งที่ไกลของอัตราเร็วข้อมูลระดับหนึ่งจะถูกจำกัด เส้นใยแสงแบบ DCF จะมีค่าดิสเพอร์ชั่นเป็นค่าลบที่มาก เมื่อนำเส้นใยแสงชนิดนี้ไปวาง

ในตำแหน่งที่เหมาะสมในระบบ จะช่วยให้ค่าดิสเพอร์ชั่นรวมมีค่าใกล้เคียงศูนย์ได้ เทคนิคนี้สามารถทำให้เส้นใยแสง SMF สามารถนำมาส่งข้อมูลที่ความเร็ว 10 Gbps ในระยะทางหลายร้อยกิโลเมตรได้

แต่ถึงกระนั้นเส้นใยแสงหลากหลายชนิดที่ผลิตขึ้นมาก็ไม่สามารถจัดการกับปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ส่งในระยะทางไกลได้ทั้งหมด กล่าวคือสามารถจัดการได้เฉพาะผลจากดิสเพอร์ชั่นยังไม่สามารถจัดการกับความไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นกับดิสเพอร์ชั่นจะส่งผลซึ่งกันและกัน เป็นผลให้สัญญาณที่ส่งผิดเพี้ยนไป เพราะฉะนั้นในการส่งสัญญาณทางไกลจึงควรจะต้องทำการลดผลของความผิดเพี้ยนทั้งที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงและที่เกิดจากดิสเพอร์ชั่น

วิธีการลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชั่นที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป คือ การจัดการผลกระทบของดิสเพอร์ชั่น (Dispersion management: DM) โดยใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชั่น (Dispersion compensating unit: DCU) ซึ่งก็คือเส้นใยแสงแบบ DCF ที่อยู่ในรูปของอุปกรณ์รวม ดังนั้นในการคำนวณจึงไม่คิดระยะทาง วิธีการนี้สามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชั่นได้ แต่ไม่สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ได้ ในปี ค.ศ. 1979 วิธีสังยุคเฟสทางแสงหรือวิธีคอนจูเกตสัญญาณแสง (Optical phase conjugation: OPC) ที่จุดกึ่งกลางระบบ โดยมีเงื่อนไขที่ว่า ค่าดิสเพอร์ชั่นของเส้นใยแสงในฝั่งครึ่งแรกและครึ่งหลังของระบบจะต้องมีคุณสมบัติเหมือนกัน ได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Yariv A. [3] ในปี ค.ศ. 1983 Fisher ได้นำเสนอว่าทั้งค่าดิสเพอร์ชั่นและความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง สามารถชดเชยได้โดยวิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ โดยการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบในเส้นใยแสงที่ไม่มีการสูญเสีย [4] แต่วิธีการนี้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในระบบจริงได้เนื่องจากมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่วางอยู่ในระบบซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ วิธีการนี้จึงไม่มีความจำเป็น จนกระทั่งมีการค้นคิดอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบ EDFA วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ จึงถูกนำกลับมาพิจารณาอีกครั้ง โดยในปี ค.ศ. 1993 Kikuchi ได้ทำการจำลองส่งสัญญาณในระบบระยะทางไกลที่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบ EDFA วางเป็นรายคาบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ สามารถลดผลของดิสเพอร์ชั่นได้อย่างสมบูรณ์ แต่ยังไม่สามารถลดผลของปรากฏการณ์เคอร์อย่างสมบูรณ์ได้ [5] แสดงให้เห็นว่าในระบบที่มีระยะทางสั้น วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบสามารถชดเชยผลกระทบที่เกิดจากการกระจายออกของสัญญาณและความไม่เป็นเชิงเส้นได้เกือบสมบูรณ์ แต่ในระยะทางไกลไม่สามารถลดได้สมบูรณ์เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณเป็นรายคาบและการเปลี่ยนแปลงไปมาของค่าดิสเพอร์ชั่น [6]

เมื่อไม่นานนี้ได้มีการทดลองที่น่าสนใจมากซึ่งได้สาธิตความสามารถของวิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ หลายการทดลอง อาทิเช่น การประยุกต์ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบเพื่อชดเชยผลของความผิดพลาดทางเฟสอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เคอร์ในระบบที่ใช้สัญญาณแบบ Return-to-zero differential phase shift keying (RZ-DPSK) ซึ่งมีอัตราเร็วถึง 40 Gbps ผลปรากฏว่าวิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบสามารถลดค่า Bit error rate (BER) ให้ต่ำลงได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มระยะทางในการสื่อสัญญาณจาก 5,200 km เป็น 6,400 km ได้อีกด้วย [7] การทดลองใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบเปรียบเทียบกับวิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ในระบบ RZ differential quadrature phase shift keying (RZ-DQPSK) ที่มีอัตราข้อมูล 21.4 Gbps และ 42.8 Gbps ผลปรากฏว่าวิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้คุณภาพสัญญาณดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ในทุกๆ ระยะการสื่อสัญญาณตั้งแต่ 2,000 km ถึง 10,000 km [8] และการทดลองซึ่งสาธิตผลว่าการใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบแทนวิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ในระบบสื่อสัญญาณซึ่งใช้การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นถึง 44 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณใช้สัญญาณแบบดีพีเอสเค ซึ่งมีอัตราข้อมูล 10 Gbps สามารถเพิ่มระยะในการสื่อสัญญาณได้ถึง 44 % [9]

นอกจากการใช้การคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบแล้ว ยังมีการนำเสนอทฤษฎีที่เพิ่มสมรรถนะของระบบสื่อสัญญาณทางแสงในระยะทางไกลอื่นๆ อีกหนึ่งในนั้นคือ การเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตของสัญญาณแสง จากการมอดูเลตทางความเข้มแสง (On-off keying: OOK) ทั้งในแบบกลับสู่ศูนย์ (Return to zero: RZ) และแบบไม่กลับสู่ศูนย์ (Non return to zero: NRZ) ซึ่งการใช้รูปแบบสัญญาณดังกล่าวยังไม่สามารถดึงเอาศักยภาพที่แท้จริงของระบบมาใช้ได้ มาเป็นการมอดูเลตสัญญาณขั้นสูง (Advanced modulation format) เช่น ดูโอไบนารี (Duobinary), เอเอ็มไอ (Alternate mark inversion: AMI), ซีเอสอาร์แซด (Carrier-suppressed return-to-zero: CSRZ) และพีเอสเค (Phase-shift keying: PSK) ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้การมอดูเลตแบบดีพีเอสเค [10] ซึ่งมีข้อดีกว่าการมอดูเลตทางความเข้มแสง คือ มีความต้องการอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนทางแสง (Optical Signal to Noise Ratio: OSNR) เพียงครึ่งหนึ่งของการมอดูเลตทางความเข้มแสง เพื่อให้ได้ BER ที่เท่ากันเมื่อใช้กับเครื่องรับสัญญาณแบบสมดุล (Balanced detector) [10],[11] และยังมีความทนทานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสูง เนื่องจากมีกำลังสัญญาณคงที่และมีค่ากำลังสัญญาณสูงสุดที่ต่ำกว่าการมอดูเลตทางความเข้มแสงเมื่อใช้กำลังงานเฉลี่ยที่เท่ากัน

การวิเคราะห์ระบบที่มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นนั้น มีวิธีการวิเคราะห์หลักๆ อยู่ 2 วิธี คือ วิธีการทำการทดลอง (Experiment) โดยมักจะใช้ระบบที่มีขนาดเล็กกว่าระบบจริง ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างยากและใช้เวลานาน อีกทั้งการกำหนดค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลองยังทำได้ยาก อีกวิธีคือวิธีการจำลองระบบ (Simulation) วิธีการนี้จะง่ายกว่า เนื่องจากสามารถกำหนดค่าต่างๆ ของระบบได้ ทำให้ผลที่ได้เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มักจะทำควบคู่ไปกับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี (Theoretical analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางตัวเลข โดยการหาสมการแทนการทำงานหรือค่าต่างๆ ในการวิเคราะห์ระบบเหล่านั้น ซึ่งเป็นสมการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอื่นๆ ได้ด้วย แล้วทำการแทนค่าต่างๆ ลงไปเพื่อทำการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงนั้น สัญญาณจะต้องได้รับผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงด้วย ทำให้การวิเคราะห์ต้องใช้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณในการคำนวณด้วย เพราะค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยเกี่ยวข้องโดยตรงกับกำลังสูงสุดของสัญญาณ แต่กำลังสูงสุดของสัญญาณนั้นจะแปรตามระยะในการสื่อสารและอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่อยู่ในระบบ ดังนั้นการใช้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณที่เปลี่ยนไปมาในการคำนวณ จะสร้างความยุ่งยากแก่การคำนวณเป็นอย่างมาก เพื่อความง่ายและสะดวกในการคำนวณ จึงมีการใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง (Path-averaged power) ในการคำนวณแทน

แต่เดิมค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจะเป็นค่าที่คิดเพียงผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงอย่างเดียว เช่น การวิเคราะห์ระบบการสื่อสารระยะทางไกลที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการจำลองระบบทางตัวเลข (Numerical simulation) ที่คำนึงถึงทั้งผลจากดิสเพอร์ชั่น ปรากฏการณ์เคอร์และผลการลดทอนจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ โดยในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีนั้น จะเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของการลดทอนจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ระหว่างระบบที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางในการคำนวณกับระบบที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงในการคำนวณ ผลปรากฏว่าที่ดิสเพอร์ชั่นผิดปกติ (Anomalous dispersion) ที่กำลังสัญญาณขาเข้าต่ำ (3 mW และ 5 mW) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยจะเหมือนกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากค่ากำลังสัญญาณจริง แต่เมื่อกำลังสัญญาณขาเข้าเพิ่มสูงขึ้น ผลการวิเคราะห์จากกำลังสัญญาณทั้งสองแบบจะไม่เหมือนกัน คือ ผลที่ได้จากกำลังสัญญาณจริงจะมีอัตราขยายของการลดทอนจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณสูงกว่า [12] หรือจะเป็นตัวอย่างที่ทำการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณไว้ที่กึ่งกลางระบบ เพื่อลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงและดิสเพอร์ชั่น ผลปรากฏว่าวิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบสามารถลดผลที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้ดีพอๆ กับการลดผลที่

เกิดจากดิสเพอร์ชั่น จึงสามารถลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่กำลังสัญญาณขาเข้ามีค่าต่ำและระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณน้อย ผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจะยังไม่รุนแรงเนื่องจากกำลังสัญญาณในระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก จึงสามารถใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดเพียงผลของการลดทอนของสัญญาณเพียงอย่างเดียวในการคำนวณได้ แต่เมื่อทำการเพิ่มกำลังสัญญาณขาเข้า ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณและระยะในการสื่อสาร การเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณจะมีมากขึ้น ส่งผลให้ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงรุนแรงขึ้นด้วย ดังนั้นการใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิมจะไม่เหมาะสม [13] และอีกตัวอย่างของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดเพียงผลของการลดทอนในการศึกษาสมรรถนะของระบบ RZ-DPSK 40 Gbps ที่ใช้อุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณวางที่กึ่งกลางระบบ โดยในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีนั้นได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ กับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดเฟส ผลปรากฏว่าที่กำลังสัญญาณขาเข้าต่ำ (1 mW และ 3 mW) ระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ แต่เมื่อกำลังสัญญาณขาเข้าเพิ่มขึ้น (5 mW) การวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีค่อนข้างคลุมเครือ ไม่สามารถตัดสินได้อย่างชัดเจนว่าระบบใดดีกว่ากัน ทำให้จำเป็นต้องใช้การจำลองระบบโดยคอมพิวเตอร์ร่วมด้วยเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะ ปรากฏว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบทุกค่ากำลังสัญญาณขาเข้า [14]

ในความเป็นจริง กำลังสูงสุดของสัญญาณจะลดลงเนื่องจากผลของดิสเพอร์ชั่นด้วย เนื่องจากการเกิดดิสเพอร์ชั่นทำให้สัญญาณที่ประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกันเป็นผลให้สัญญาณที่ปลายทางขยายออก ซึ่งการขยายออกของสัญญาณส่งผลให้ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณลดลงด้วย และหากทำการพิจารณาในบางระบบ เช่น ในระบบที่ไม่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเลย ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่มีช่วงในการชดเชยดิสเพอร์ชั่นยาวมากเป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตรหรือระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ระบบเหล่านี้จะมีการสะสมของค่าดิสเพอร์ชั่นค่อนข้างมาก ส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางในระบบได้รับผลจากดิสเพอร์ชั่นอย่างรุนแรง ผลจากดิสเพอร์ชั่นที่เกิดขึ้นนี้นอกจากจะทำให้พัลส์ของสัญญาณขยายออก (Pulse broadening) แล้ว ยังส่งผลให้กำลังสูงสุดของสัญญาณลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ซึ่งการลดลงของกำลังสัญญาณสูงสุดนี้จะมากกว่าการลดลงของกำลังสัญญาณสูงสุดที่ได้รับผลจากการลดทอนกำลังสัญญาณด้วย ดังนั้นหากค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น คิดเพียงผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงอย่างเดียว ผลในการวิเคราะห์อาจจะไม่ถูกต้องแม่นยำและคลุมเครือ ดังเช่น ผลการวิเคราะห์

ผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) ของค่าความผิดพลาดเฟส (Phase error) ระหว่างระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบกับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ [14] ซึ่งผลที่ออกมาจะเห็นว่าที่กำลังสัญญาณขาเข้า 5 mW จะไม่สามารถสรุปได้แน่นอนว่าระบบใดมีสมรรถนะที่ดีกว่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิมที่คิดเพียงผลของการลดทอนของสัญญาณนั้น จะให้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่สูงเกินความจริงมาก ดังนั้นเมื่อนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ในระบบที่ได้รับผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง จึงทำให้ได้รับผลจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงเกินจริง ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการคำนวณผิดเพี้ยนทำให้การวิเคราะห์คลาดเคลื่อน ไม่ถูกต้องและไม่แม่นยำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการคำนวณค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยสูงสุดที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นในการคำนวณเพื่อทำการวิเคราะห์ระบบ แทนค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิมที่คิดเพียงผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเพียงอย่างเดียว โดยในการคำนวณหาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยนั้นจะคำนวณที่การส่งสัญญาณแบบบิตเดียวและการส่งแบบหลายบิต โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 3 ระบบ คือ ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่ระยะที่ทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นมากกว่าหนึ่งช่วงของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงและระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นที่กึ่งกลางระบบเพียงครั้งเดียว แล้วนำไปใช้ในการหาผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดเฟสเทียบกับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิม และยืนยันผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยการจำลองระบบโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะเห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองระบบโดยคอมพิวเตอร์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสามารถนำค่ากำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยแบบใหม่นี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบเพื่อความถูกต้องแม่นยำต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่น ที่ให้ผลการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงได้ถูกต้องแม่นยำและใกล้เคียงกับผลที่ได้ในการสื่อสัญญาณแสงในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง (Optical fiber) จริง
2. นำค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ระหว่างระบบที่ใช้วิธีคอนจูเกตที่กึ่งกลางระบบและระบบที่ใช้วิธีจัดการดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ
3. นำเสนอค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อนำเอาไปใช้ในการวิเคราะห์การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในอนาคต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้โปรแกรม OptiSys 5.0 ในการสร้างแบบจำลองระบบ เพื่อนำมาใช้ในการพิสูจน์ทฤษฎีว่าสอดคล้องกันหรือไม่
2. ในแบบจำลองระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ อุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณจะเป็นแบบอุดมคติเท่านั้น
3. ในแบบจำลองระบบจะเป็นระบบที่มีการชดเชยดิสเพอร์ชั่น ที่มีความเป็นอุดมคติของ DCU ซึ่งจะไม่มีผลของความยาวของเส้นใยแสงและการลดทอนสัญญาณใน DCU
4. อุปกรณ์ภาครับของแบบจำลองมีความเป็นอุดมคติโดยมิได้นำผลของสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์ภาครับมาใช้ในการคำนวณและการจำลองระบบ เพราะว่าเพื่อจะดูผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างที่สัญญาณเดินทางในเส้นใยแสงเท่านั้น
5. ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณที่ศึกษามีเพียงค่าการลดทอนของสัญญาณและค่าดิสเพอร์ชั่นเท่านั้น
6. อัตราบิตที่ใช้ในแบบจำลองเป็น 5 Gbps และ 40 Gbps ในการส่งสัญญาณช่องสัญญาณเดียว
7. รอบทำงาน (Duty cycle) ในแบบจำลองเป็น 66%

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสง
2. ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงกำลังสัญญาณ Gaussian แบบพัลส์เดียวที่เดินทางในเส้นใยแสง
3. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังสัญญาณแบบพัลส์เดียวในหนึ่งช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณโดยแยกคิดเป็นสองกรณี คือ กรณีที่กำลังสัญญาณลดลงโดยผลของการลดทอนเพียงอย่างเดียว และในกรณีที่กำลังสัญญาณลดลงทั้งจากผลของการลดทอนสัญญาณและผลของดิสเพอร์ชั่น
4. ศึกษาเกี่ยวกับระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบในช่องสัญญาณเดียวและหลายช่องสัญญาณ
5. คำนวณค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยสูงสุดตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่น ทั้งในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบแบบที่มีการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่ช่วงของการชดเชยดิสเพอร์ชั่นมีระยะทางมากขึ้น และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบที่มีการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่นที่ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณ
6. นำค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยสูงสุดตามระยะทางที่หาได้ไปใช้ในการคำนวณค่าผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณที่เดินทางในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบในทางทฤษฎี
7. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี
8. สร้างแบบจำลองระบบด้วยโปรแกรม OptiSys 5.0 เพื่อทดสอบทฤษฎีข้างต้น
9. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกำลังสัญญาณแบบหลายบิตในหนึ่งช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณโดยแยกคิดเป็นสองกรณี คือ กรณีที่กำลังสัญญาณลดลงโดยผลของการลดทอนเพียงอย่างเดียว และในกรณีที่กำลังสัญญาณลดลงทั้งจากผลของการลดทอนสัญญาณและผลของดิสเพอร์ชั่น
10. คำนวณค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยสูงสุดตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นแบบหลายบิตที่ทำการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคและที่ทำการมอดูเลตทางความเข้มแสง ทั้งในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบแบบที่มีการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่นทุกช่วงอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบที่ช่วงของการชดเชยดิส

เพอร์ชั่นมีระยะทางมากขึ้น และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบที่มีการชดเชยค่าดิสเพอร์ชั่นที่ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณ

11. นำค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยสูงสุดตามระยะทางที่หาได้ไปใช้ในการคำนวณค่าผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณที่เดินทางในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบในทางทฤษฎี
12. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี
13. วิเคราะห์ผลจากแบบจำลองและผลในทางทฤษฎีว่าสอดคล้องกันหรือไม่อย่างไร และถ้าไม่สอดคล้องจะมีการอธิบายอย่างสมเหตุสมผลว่าสาเหตุใดผลลัพธ์ที่ออกมาจึงไม่สอดคล้องกับทฤษฎี
14. เรียบเรียงรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยใหม่ที่ให้ความถูกต้องกับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบเชิงทฤษฎีมากกว่าค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิม
2. พัฒนาการวิเคราะห์ระบบการสื่อสารทางแสงให้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น
3. ข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ และระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ
4. บทความวิชาการตีพิมพ์ในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ