



วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่เพื่อลดค่า FWM ในระบบ DWDM โดยใช้เทคนิคการจับคู่
ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน

THE NEW CHANNEL ALLOCATION METHODOLOGY TO REDUCE FOUR-WAVE MIXING IN
DWDM SYSTEM USING UNEQUAL-SPACED CHANNEL MATCHING TECHNIQUE

นายนพต อินจวงจิริกิต¹ และอชิระ จำปาเทศ^{2*}

¹อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

^{2*} ผู้จัดการศูนย์อุปกรณ์พิเศษ, ส่วนปฏิบัติการวิศวกรรมสื่อสาร กรุงธนใต้, บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)

*Corresponding author, E-mail: ashiratot@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่เพื่อลด FWM ในระบบ DWDM โดยใช้เทคนิคการจับคู่ช่องสัญญาณที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน โดยเปรียบเทียบความสามารถในการลด FWM ของวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่ และวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES ซึ่งเป็นวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบเดิม จากผลการวิจัยพบว่า 1) วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่สามารถลด FWM ได้ดีกว่าแบบเดิม 2) วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่ สามารถเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณได้มากกว่าแบบเดิม และ 3) วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายโอนข้อมูลได้ถึง 20Gb/s ซึ่งสูงกว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบเดิม
คำสำคัญ: การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น; การผสมคลื่นสี่คลื่น; การกระจายเปลี่ยนในเส้นใยแสง; ผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นในเส้นใยแสง

ABSTRACT

This paper presents a new channel allocation method to reduce FWM in DWDM systems by using unequal-spaced channel matching techniques. By comparing the FWM reduction capability of the new channeling and the ES traditional channel allocation method. From research result, found that 1) the new channel allocation method was able to reduce FWM better than the traditional method, 2) the new channel allocation method can increase the number of channels than the traditional method, and 3) the new channel allocation method can increase the data transfer rate up to 20Gb/s, which is higher than the traditional channel allocation method.

KEYWORD: Dense Wavelength Division Multiplexing; Four-Wave Mixing; Dispersion Shift Fiber; Nonlinear Optical Effects

Nainapas Injounjirakit¹ and Ashira Jumpates^{2*}

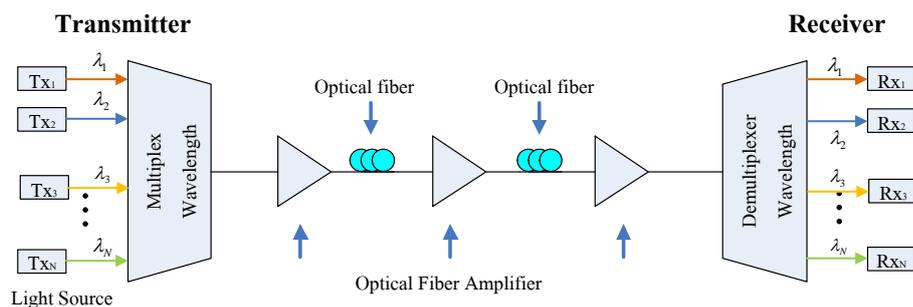
¹Instructor, Information and Communication Technology Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thailand

^{2*}Special Equipment Center Manager, South Krungthon Communication Engineering Operations Division, National Telecom Public Company Limited, Thailand

1. บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารที่มีระยะทางไกลและส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงที่มีข้อมูลขนาดใหญ่ เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องใช้เทคโนโลยีโทรคมนาคมที่มีประสิทธิภาพสูง มาใช้ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นระบบการสื่อสารไร้สาย และระบบการสื่อสารที่ผ่านสายนำสัญญาณ ดังนั้นระบบสื่อสารที่มีความเสถียรภาพมากที่สุดในปัจจุบัน คือการสื่อสารบนเครือข่ายผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ตัวอย่างข้อดีของระบบดังกล่าวคือ แบนด์วิดท์ที่กว้าง (ส่งข้อมูลได้จำนวนมาก) ค่าสูญเสียต่ำ ส่งได้ระยะทางไกล และไม่มีผลจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นจากการส่งข้อมูลเป็นจำนวนมาก และส่งหลายช่องสัญญาณไปพร้อมๆกัน โดยใช้ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) จะเกิดการเกิดปรากฏการณ์ผสมคลื่นสี่คลื่น หรือ FWM (Four Wave Mixing) เมื่อระบบสื่อสารที่มีระยะทางไกล ต้องอาศัยการขยายสัญญาณด้วย EDFA (Erbium-doped fiber amplifier) ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 (C-band) [1] นั่นคือมีส่วนทำให้เกิดผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับ 3 [2] ในระบบเครื่องส่งแบบ DWDM เป็นผลทำให้สัญญาณปลายทางอ่อนลง สาเหตุหลักเกิดจากรูปแบบการจัดช่องสัญญาณที่มีระยะ “กริด” ที่เท่ากัน (ES : Equally Spaced) จากการวิเคราะห์ทางตัวเลขแล้ว การจัดช่องสัญญาณแบบ ES ส่งผลให้เกิด FWM สูงสุด

จากงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการออกแบบการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่มีชื่อว่า decreased PRUS (Paired Repeated Unequally Allocation Channel) เพื่อลดผลกระทบจาก FWM ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM เป็นสำคัญ เป็นการปรับปรุงและพัฒนาจากการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS (Repeated Alternate Unequally Spaced Channel) [3-9] และ paired URAUS (Unequally Repeated Alternate Unequally Spaced Channel) [10] สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นชนิด DSF (Dispersion Shift Fiber) และจะไม่พิจารณาผลกระทบของ SPM (Self-phase Modulation) และ CPM (Cross-phase Modulation) จะพิจารณาเฉพาะค่าผลกระทบที่เกิดจาก FWM เป็นหลัก และค่าความถี่ของระยะห่าง ต้องไม่ต่ำกว่า 50GHz เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์เชิงแสงนั่นเอง



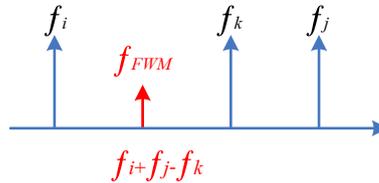
รูปที่ 1 แสดง โครงสร้างของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM

2. ทฤษฎีและการวิเคราะห์

2.1. FWM (Four-Wave Mixing)

ค่าความถี่แสง f_{FWM} ของแสงที่เกิด FWM ซึ่งจะเกิดจากผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3 ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความถี่แสงทั้ง 3 คือ f_i, f_j และ f_k ตามสมการ

$$f_{FWM} = f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, k \neq i, j \quad (1)$$



รูปที่ 2 รูปแบบการกระจายตัวของความถี่แสงของ FWM ที่มาจากการสอดแทรกระหว่างกัน

จากรูปที่ 2 ค่า f_{FWM} จะเกิดขึ้นระหว่างช่องสัญญาณ f_i, f_j และ f_k เป็นความถี่ใหม่ที่เราไม่ต้องการ ดังนั้นจากสมการที่ (1) f_{FWM} จะเกิดขึ้นใหม่จำนวน 12 ความถี่จะซ้อนทับกันกับ f_i, f_j และ f_k เป็นผลทำให้สัญญาณปลายทางมีค่าอ่อนลงนั่นเอง

สมการความสัมพันธ์ของคลื่นความถี่ สมการที่ (1) นี้สามารถแยกตัวประกอบการเกิด FWM ขึ้นมาใหม่ได้ทั้งหมด 12 ความถี่ ดังนี้

$$f_1 = f_i + f_i - f_k, f_2 = f_j + f_i - f_k, f_3 = f_i + f_i - f_j, f_4 = f_j + f_j - f_k, f_5 = f_i + f_k - f_j, f_6 = f_j + f_j - f_i, f_7 = f_j + f_k - f_i, f_8 = f_k + f_k - f_j, f_9 = f_k + f_k - f_i, f_{10} = f_i + f_j - f_k, f_{11} = f_k + f_i - f_j, f_{12} = f_k + f_j - f_i.$$

FWM จะกลายเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) ดังนั้นความถี่ของ Noise ซึ่ง f_n ก็คือผลรวมของความถี่ f_{FWM} ที่มีจำนวน n นั่นเอง แสดงในสมการ (2)

$$f_n = f_{FWM}^n (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

โดยที่ m เป็นจำนวนเต็มบวก

ในบทความนี้พิจารณาความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก FWM ของสัญญาณแสง 2 ตัวคือ Total FWM Power และ Bit Error Rate : BER (จะอธิบายในหัวข้อ 2.2 ต่อไป) ซึ่งค่าทั้ง 2 นี้เป็นตัวชี้วัดเพื่อเปรียบเทียบวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ค่า Total FWM Power ที่เกิดจากการรวมกันของความถี่ f_{FWM} ที่เป็นไปได้ เมื่อมีจำนวนของช่องสัญญาณที่ใช้งานคือ N_c จากการสอดแทรกระหว่างกันของช่องสัญญาณ ค่าดังกล่าวยังมีค่าน้อยแสดงถึงความรุนแรงน้อยแต่มีคุณภาพสูง สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_{ijk}) \quad (3)$$

เมื่อ $P_{FWM}(f_{ijk})$ คือพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากความถี่ f_m และ $P_{FWM}(f_{ijk})$ คือค่าพลังงานที่ได้จาก FWM เกิดจากความถี่ f_{ijk} ดังนั้น Total FWM Power สามารถคำนวณได้จาก

$$P_{FWM}(f_{i,j,k}) = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left(\frac{d_{ijk} x^3 L_{eff}}{A_{eff}} \right) P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta_{FWM} \quad (4)$$

เมื่อ d_{ijk} คือองค์ประกอบที่แสดงสถานะเสื่อม, P_i , P_j และ P_k คือกำลังอินพุตที่ความถี่ f_i , f_j และ f_k , λ คือค่าความยาวคลื่น, n คือค่าดัชนีหักเห, L_{eff} คือระยะห่างทางประสิทธิผล, α คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย, x^3 คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3, c คือค่าความเร็วแสงและ A_{eff} คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล

2.2. อัตราบิดผิดพลาด (Bit Error Rate : BER)

อัตราบิดผิดพลาดคืออัตราส่วนของจำนวนบิดผิดพลาดทั้งหมดของจำนวนข้อมูลต่อจำนวนบิดทั้งหมด ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของค่าดังกล่าว คือ 10^{-6} เนื่องจากค่าความผิดพลาดในการสื่อสารสัญญาณแสงมีค่าน้อยมาก การจำลอง BER ใช้การประมาณค่าแบบ Gaussian ค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ในระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM สามารถหาได้จาก [11-12]

$$P_e = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

เมื่อ t คือเวลา Q คือ ปัจจัยด้านคุณภาพ (Quality Factor) ซึ่งหาได้จาก

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{th} + N_{sh} + N_{FWM} + \sqrt{N_{th}}}} \quad (6)$$

เนื่องจากการสูญเสียของ Thermal noise (N_{th}) และ Shot Noise (N_{sh}) มีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ N_{FWM} ในระบบ DWDM ดังนั้นค่า Q ที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของ FWM สามารถแสดงให้เห็นสมการดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{FWM}}} = \frac{2bP_s}{\sqrt{b^2 P_s P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_s}}{\sqrt{P_{FWM}}} = \frac{2\sqrt{P_o e^{-\alpha L}}}{P_{FWM}} \quad (7)$$

เมื่อ P_s คือกำลังของสัญญาณแสงที่รับได้และ N_{FWM} คือกำลังสูญเสียที่เกิดจาก FWM สามารถหาได้จากสมการนี้

$$N_{FWM} = 2b^2 P_s \left(\frac{P_{FWM}}{8} \right) \quad (8)$$

และ b คือเรสปอนซิวิตี ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$b = \frac{\eta_e}{h_f} = \frac{\eta_e \lambda}{h_c} \tag{9}$$

เมื่อ η คือประสิทธิภาพควอนตัม e คือประจุอิเล็กตรอน และ h คือ Planck's constant กำหนดให้มีค่าเท่ากับ (6.626×10^{-34} J.s) ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ Avalanche Photo Diode (APD) $\eta = 80\%$ [13-14]

2.3. รูปแบบการจัดช่องสัญญาณ

ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายการทำงานเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยแบ่งกลุ่มของการจัดช่องสัญญาณหลักๆ มี 2 แบบ คือ แบบ ES (Equally Spaced) และ US (Unequally Spaced) ซึ่งแบบ US นั้น มีการพัฒนาการจัดรูปแบบมาโดยตลอด เช่น RAUS, paired URAUS และ decreased PRUS ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายรายละเอียดดังนี้

2.3.1. การจัดช่องสัญญาณแบบ ES

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES คือวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีระยะ “กริด” ที่เท่ากัน สำหรับใช้ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM ในปัจจุบัน จากการศึกษางานวิจัยหลายฉบับนี้ชี้ให้เห็นว่า การจัดช่องสัญญาณแบบนี้เป็นวิธีการเว้นระยะห่าง (space) ระหว่างแต่ละช่องสัญญาณ (Δf_c) ที่มีขนาดเท่ากันเป็นผลทำให้เกิดผลกระทบจาก FWM ในระดับสูงจะแสดงค่าความถี่ไว้ในตารางที่ 1

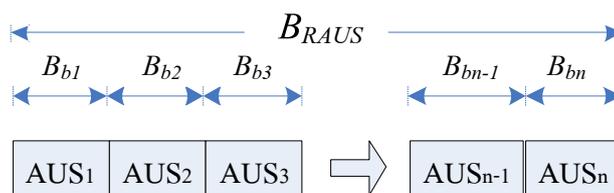
ตารางที่ 1 แสดงค่าการจัดสรรความถี่แบบ ES ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1		2		→		39		40
Δf_c (GHz)		100		100	→	100		100	
f_i (THz)	192.1		192.2		→		195.9		196.0

จากตารางที่ 1 การจัดสรรความถี่ที่มีการเว้นระยะ Δf_c มีค่าเท่ากันตลอดคือ 100GHz ซึ่งความถี่ช่องสัญญาณที่ 1 เริ่มต้นที่ 192.1THz และความถี่ช่องสัญญาณสุดท้ายคือ 40 ความถี่เท่ากับ 196.0THz

2.3.2. การจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS (Repeated Alternate Unequally Spaced)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS คือวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีระยะ “กริด” ที่ไม่เท่ากัน เป็นวิธีการที่ได้จากงานวิจัยเพื่อลดผลกระทบจาก FWM เป็นรูปแบบการจัดช่องสัญญาณแบบ US จากงานวิจัยดังกล่าว สามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 3

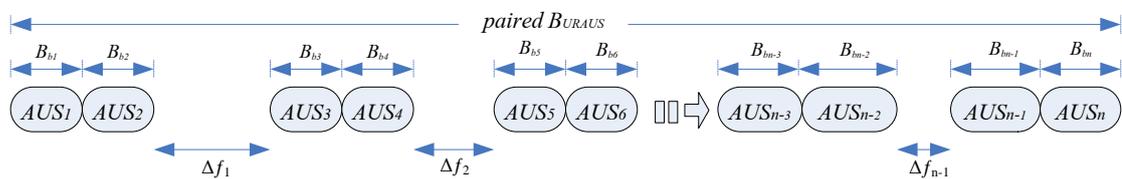


รูปที่ 3 แสดงรูปแบบการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS

จากรูปที่ 3 เป็นการนำ Base Unit มาทำต่อกันจนซ้ำให้ครบจำนวนช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ซึ่งจำนวน Base Unit จะประกอบไปด้วย AUS1, AUS2, AUS3, .. AUSn จากวิธีการจัดช่องสัญญาณเป็นจุดเริ่มต้นนี้ที่ผู้วิจัยสนใจแนวคิดและการออกแบบ จึงเป็นที่มาของการพัฒนาการจัดช่องสัญญาณแบบ paired URAUS ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.3.3.การจัดช่องสัญญาณแบบ paired URAUS (Unequally Repeated Alternate Unequally Spaced)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ paired URAUS คือวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีระยะ “กริด” ที่ไม่เท่ากัน เป็นวิธีการที่ได้จากงานวิจัย [10] เพื่อลดผลกระทบจาก FWM ภายใต้แนวคิดจาก การจัดช่องสัญญาณแสงแบบไม่เท่ากัน (US) ผู้วิจัยได้แสดงรูปแบบการจัดช่องสัญญาณแสงแบบ paired URAUS ดังรูปที่ 4

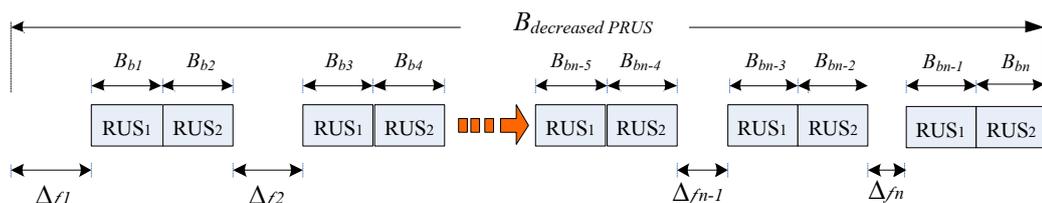


รูปที่ 4 แสดงรูปแบบการจัดช่องสัญญาณแบบ paired URAUS

จากรูปที่ 4 เป็นการนำ Base Unit มาจับคู่กัน โดยที่ AUS1, AUS2, AUS3, AUS4, AUS5 และ AUS6 คือ Base Unit ที่ประกอบไปด้วยชุดความถี่ภายในเท่ากับ {75 50 150 125 100}, {125 150 50 75 100}, {50 150 125 100 75}, {125 100 75 50 150}, {100 75 50 150 125} และ {75 100 125 150 50} โดยที่ Δf1, Δf2 และ Δf3 คือระยะห่างระหว่าง Base Unit มีค่าเท่ากับ 62.5GHz, 56.25GHz และ 50GHz ตามลำดับ จากปัญหาการเกิด FWM ที่ได้อธิบายมาแล้ว ผลยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS ต่อไป

2.3.4.การจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS (Paired Repeated Unequally Spaced)

วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS คือวิธีการจัดช่องสัญญาณแสงที่มีระยะ “กริด” ที่ไม่เท่ากัน สร้างขึ้นมาเพื่อลดผลกระทบจาก FWM ให้ได้มากที่สุด จากเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ paired URAUS พบว่า Δfn คือระยะห่างระหว่าง Base Unit เมื่อนำมาสร้างรูปแบบการเว้นระยะระหว่าง Base Unit ที่มีการจับคู่ ผลคือสามารถช่วยลด FWM ได้เป็นอย่างมาก ผู้วิจัยจึงจำลองรูปแบบที่ดีที่สุด ที่ทำให้ FWM ลดลงมากที่สุดดังแสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงรูปแบบการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS

จากรูปที่ 5 เป็นการนำ Base Unit มาจับคู่กัน โดยที่ RUS_1 และ RUS_2 คือ Base Unit ที่ประกอบไปด้วยชุดความถี่ภายในเท่ากับ $\{75\ 50\ 125\ 100\ 150\}$ และ $\{50\ 75\ 100\ 125\ 150\}$ และ $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3$ และ Δf_4 คือระยะห่างระหว่าง Base Unit มีค่าเท่ากับ $62.5\text{GHz}, 58.34\text{GHz}, 54.13\text{GHz}$ และ 50GHz ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงการจัดสรรความถี่แบบ decreased PRUS ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1		2		3		4		5		6		7		8	
Δf_c (GHz)		62.5		75		50		125		100		150		50		75
f_i (THz)	192.1		192.16		192.23		192.28		192.41		192.51		192.66		192.71	
Channel	9		10		11		12		13		14		15		16	
Δf_c (GHz)		100		125		150		58.34		75		50		125		100
f_i (THz)	192.78		192.88		193.01		193.16		193.22		193.29		193.34		193.47	
Channel	17		18		19		20		21		22		23		24	
Δf_c (GHz)		150		50		75		100		125		150		54.13		75
f_i (THz)	193.57		193.72		193.77		193.84		193.94		194.07		194.22		194.27	
Channel	25		26		27		28		29		30		31		32	
Δf_c (GHz)		50		125		100		150		50		75		100		125
f_i (THz)	194.35		194.4		194.52		194.62		194.77		194.82		194.9		195.0	
Channel	33		34		35		36		37		38		39		40	
Δf_c (GHz)		150		50		75		50		125		100		150		50
f_i (THz)	195.12		195.27		195.32		195.4		195.45		195.57		195.67		195.82	
Channel	41		42													
Δf_c (GHz)	41		42													
f_i (THz)		75														

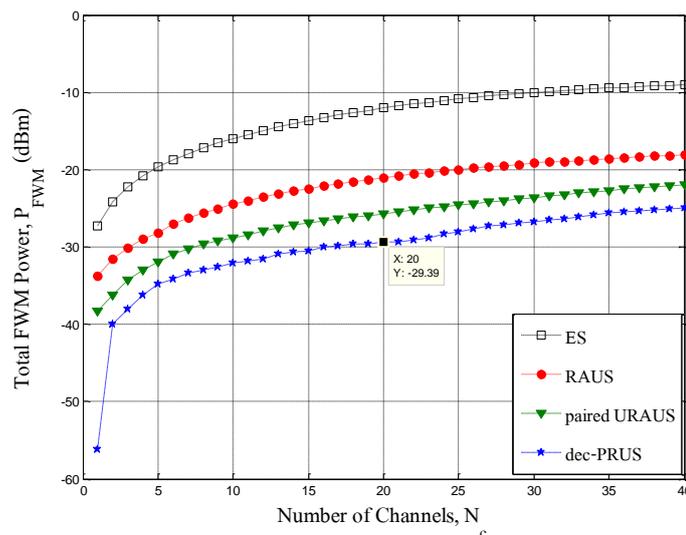
จากตารางที่ 2 เป็นการกำหนดค่าความถี่แสงของช่องสัญญาณ สำหรับใช้งานในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM ที่มีรูปแบบการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS โดยเฉพาะช่วงความถี่ที่ใช้งานคือ 192.1-196.0THz เมื่อนำมาจัดรูปแบบการจัดช่องสัญญาณดังกล่าวตามตารางที่ 2 ซึ่งจะเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณเป็น 42 ช่องสัญญาณ สิ่งที่น่าสนใจคือ สามารถเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณได้มากกว่า การจัดช่องสัญญาณแบบ ES ซึ่งมีเพียงแค่ 40 ช่องสัญญาณ ดังนั้นการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS ทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น 20Gb/s นอกเหนือจากการลดผลกระทบจาก FWM งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อใช้ในการจำลอง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเส้นใยแก้วนำแสงที่กำหนดไว้สำหรับการจำลองการทำงาน

ลำดับที่	พารามิเตอร์	ข้อมูลจำเพาะ
1.	ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง	Dispersion shift fiber (DSF)
2.	ย่านความถี่ที่ใช้งาน	1526.55 -1560.61 nm / 192.1 – 192.6 THz
3.	กำลังของสัญญาณค่านอินพุต (P_{in})	10 dBm
4.	โครมาติกดิสเพอร์ชัน (D)	0 ps/km/nm
5.	ดัชนีของดิสเพอร์ชัน ($dD/d\lambda$)	0.06 ps/km/nm ²
6.	ดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง (n)	1.45
7.	ความเร็วของแสงในอากาศ (c)	3×10^8 m/s
8.	ความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับ 3	6×10^{-15}
9.	องค์ประกอบที่แสดงสถานะเสื่อม (d_{ijk})	3 เมื่อ $i=j$ และ 6 เมื่อ $i \neq j$
10.	ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง (L)	80 km
11.	ระยะทางประสิทธิภาพ (L_{eff})	20 km
12.	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (α)	0.2 dB/km

3. ผลวิเคราะห์เชิงตัวเลข

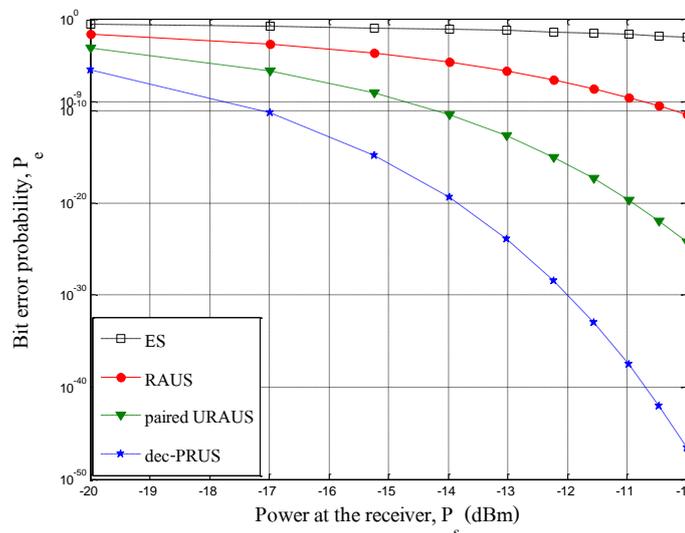
เมื่อนำสมการที่ (1) มาคำนวณหาจำนวน FWM ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 คือจำนวน 40 ช่องสัญญาณ พบว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS มีค่าต่ำกว่าวิธีอื่นๆ ได้แก่วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RAUS, Paired URAUS และ Decreased PRUS ผลรวมของจำนวน FWM ที่เกิดขึ้นคือ 33,820 4,782 4,211 และ 1,873 ตามลำดับ



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RAUS, paired URAUS และ decreased PRUS

จากรูปที่ 6 ที่จำลองไว้ภายใต้มาตรฐาน ITU-T G.694.1 โดยมีจำนวน 40 ช่องสัญญาณ ผู้วิจัยนำค่าจำนวนความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นบนตำแหน่งของช่องสัญญาณทั้งหมด 40 ช่องสัญญาณ นำมาหาค่ากำลัง ตามสมการที่ (4) การอ่านค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ที่เกิดขึ้น จะอ่านค่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางแบนด์วิดธ์ของช่องสัญญาณทั้งหมดจำนวน 40 ช่องสัญญาณ นั่นก็คือช่องสัญญาณที่ 20 นั้นเอง ดังนั้นค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM จากวิธีการจัดช่องสัญญาณรูปแบบต่างๆ เท่ากับ -12.0, -22.3, -26 และ -29.39dBm ตามลำดับ จากผลลัพธ์ที่ได้ จะแสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS ทำให้ค่ากำลังประสิทธิผลของ FWM ลดลงได้มากกว่าแบบวิธีอื่น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM ดีขึ้น

จากรูปที่ 7 ผู้วิจัยใช้เกณฑ์การวัดค่าอัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-9} เนื่องจากการสื่อสารทางแสงมีค่าอัตราบิตผิดพลาดน้อยมาก ค่าอัตราบิตผิดพลาดที่คำนวณได้จากการจัดช่องสัญญาณแบบต่างๆ เท่ากับ -5, -10.8, -14.8 และ -17.9 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS สามารถลดการเกิดอัตราบิตผิดพลาดได้มากกว่า วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบอัตราบิตผิดพลาดที่เกิดจากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, RAUS, paired URAUS และ decreased PRUS

4. สรุปผลวิจัย

การวิจัยเรื่องวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ decreased PRUS เพื่อลดผลกระทบจาก FWM ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM ด้วยวิธีการจำลองนี้ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถลดผลกระทบจาก FWM ได้ดีกว่าวิธีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES ในปัจจุบัน ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วแบบ DWDM ที่มีการจัดช่องสัญญาณแบบ ES ใช้วิธีการลด FWM ด้วยตัวกรองสัญญาณแสง (Optical Filter) ด้านเครื่องรับปลายทางที่จุด N-Channel DeMUX เมื่อเราใช้วิธีการจัดช่องสัญญาณแบบใหม่ จะสามารถลดการใช้ Optical Filter ได้ และสิ่งที่เพิ่มขึ้นมาคือ เพิ่มอัตราการถ่ายโอนข้อมูลสูงขึ้นไปถึง 20Gb/s นั้นเอง

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ITU-T Recommendation G.694.1. *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, ITU-T Study Group 15.
- [2] B.Michael, W. Eric and S. Van: *Fiber Optics Handbook*. New York, USA: McGraw Hill, OSA, 2002.
- [3] F, Forghieri. et al. Marcuse: Reduction of Four-wave mixing crosstalk in WDM system using unequally spaced channels. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 1994, 6, pp.754-756.
- [4] F, Forghieri. WDM system with unequally spaced channels. *J. Lightw. Technol, Lett*, 1995, 13, pp.889-891.
- [5] A, Okada. et al. Reduction of four-wave mixing crosstalk using a novel hybrid WDM/TDM technique. *ECOC'98, Proc. Eur. Conf. Opt. Commu*, 1998, pp.289-290.
- [6] S, Kojima. and T, Numai. Theoretical analysis of modified repeated unequally spaced frequency allocation in FDM lightwave transmission systems. *J. Lightw. Technol*, 2006, 24, pp. 2786-2797.
- [7] Y, Nagatani. et al. Theoretical analysis of frequency allocation in FDM lightwave transmission system. *J. Lightw. Technol*, 2008, 26, pp.1993-2001.
- [8] S, Kojima. and T, Numai. Reduction of four-wave mixing noise in FDM optical fiber transmission system in unequally spaced frequency allocation using base units. *J. Opt. Commu*, 2013, 294, pp.305-310.
- [9] L, Zhang. and J, Tang. Label-switch architecture for IP traffic over WDM network. *IEEE Proc-Common*, 2000, 147 (5), Oct, pp.269-276.
- [10] A, Jumpates. et al. The analysis of paired unequally spaced repeated alternate unequally spaced allocation channels for FDM lightwave. *In PIERS*. Suzhou: China, 2011, pp.754-758.
- [11] Tang, J, Kheong S.C. and Zhang, L. Optical nonlinear effects on the performance of IP traffic over GMPLS-base DWDM networks. *J. Computer Commu*, 2003, 26, pp.1330-1340.
- [12] Chin T.S. Abbou F.M. and Tat E.H. Impact of four wave mixing (FWM) in routing and wavelength assignment. *American J. Applied Sci*, 2008, 5, pp.1059-1063.
- [13] Fujita, S. et al. 10Gb/s 100km optical fiber transmission experiment using high-speed MQW DFB-LD and backilluminated GaInAs APD. *American Electron Lett*, 1986, 5, pp.702-703.
- [14] Fujita, S. et al. High sensitivity 5Gb/s optical receiver module using Si IC GaInAs APD. *Electron Lett*, 1990, 26, Pp.175-176.