

เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณเพื่อลด

ผลกระทบจาก Four Wave Mixing

The Technique to Arrange Channel Allocation to Reduce The Effect of FWM

พิษณุ รอดยัง¹ วิสวาท ราชณรงค์² สุทธิชัย นพนาศิพงษ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ภาควิชาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU เพื่อลดผลกระทบจาก FWM ซึ่งพัฒนามาจากเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU โดยพิจารณาการจัดระยะห่างช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 - 1560.61 nm ของสัญญาณ DWDM ที่ได้จาก EDFA เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเทคนิคแบบ ERUS-EBU มีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิคแบบ ERUS-EBU ที่ $f_{FWM} = f_i$ ดังนั้นเทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU สามารถปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดและประสิทธิภาพของ FWM ให้มีค่าลดลงในระบบการส่งสัญญาณ DWDM

คำสำคัญ: การจัดระยะห่างช่องสัญญาณ, การผสมกันสี่คลื่น, การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่นที่หนาแน่น

Abstract

This paper presents the new technique ERUS-UBU to arrange the channel allocation to reduce the effect of FWM. We proposed a new technique to space channel allocation of ITU-T G.694.1 standard. By developing a technique of ERUS-EBU. We consider the EDFA device to generate wavelengths between 1529.55 – 1560.61 nm for DWDM signal. From the simulation results, It is found that the new proposed technique ERUS-UBU is the better performance of the efficiency of FWM lights ($f_{FWM} = f_i$) by comparing the proposed technique with ERUS-EBU. The new proposed technique can improve the error probability and decrease the efficiency of FWM light in DWDM transmission systems.

Key words: Spaced channel allocation, Four-Wave Mixing, Dense Wavelength Division Multiplexing

1. บทนำ

บทความนี้ได้ทำการนำเสนอวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณในระบบส่งสัญญาณ DWDM ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1 [1] โดยกำหนดสัญญาณที่ได้อยู่ในช่วงของ

ความยาวคลื่น 1529.55 - 1560.61 nm ที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบ EDFA ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU ที่ได้แก่ไขการเกิดผลกระทบของ FWM ให้ลดลง ซึ่งการจัด

ระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU ได้นำเสนอการแก้ไขปัญหของการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ES [3], US [4] และ RUS [5] ซึ่ง ES จะเกิดผลกระทบเนื่องจาก FWM สูงที่ $f_{FWM} = f_i$ โดยการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU จะเกิดผลกระทบที่เกิดจาก FWM ลดลงมากกว่า ES โดย ERUS-EBU ใช้แบนด์วิดท์ที่แคบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ES ในช่วงของความยาวคลื่นที่เท่ากัน แต่การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU จะมีความถี่ของ FWM ที่เกิดขึ้นนั้น ไปแทรกสอดกับช่องสัญญาณจำนวนมาก ดังนั้นจากการสังเกตนี้เราจึงได้มีการปรับปรุงการจัดช่องสัญญาณโดยอาศัยการเลือกของช่องสัญญาณเรียกว่า ERUS-UBU เพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบเนื่องจากการเกิดความถี่ FWM ได้ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ES และ ERUS-EBU เนื่องจากความถี่ FWM ที่เกิดขึ้นนั้นไปแทรกสอดช่องสัญญาณจำนวนมากที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU ในระบบการส่งสัญญาณ DWDM

2. ทฤษฎีการวิเคราะห์

2.1 ผลกระทบของการเกิด Four-Wave Mixing (FWM)

ระบบการส่งสัญญาณแบบ DWDM ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันและเป็นสาเหตุให้เกิดความเสื่อมลงของสัญญาณเป็นรูปแบบการกระจายตัวของความถี่แสง [8] เมื่อ f_i, f_j และ f_k คือสัญญาณความถี่ของแสงและ f_{FWM} คือความถี่ของแสงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสัญญาณทั้งสามความถี่อื่นเนื่องมาจากผลกระทบของ FWM ซึ่งหาได้จาก $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$ (ในบทความนี้พิจารณาผลกระทบของ FWM เป็นสิ่งที่สำคัญ โดยจะไม่พิจารณาผลกระทบของ self-phase modulation, cross-phase modulation และการเสื่อมลงของรูปคลื่นอันเนื่องมาจากมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด) กำลังของสัญญาณด้านเอาต์พุตที่ความถี่ f_{FWM} ที่เกิดจากการรวมกันของความถี่ ที่เป็นไปได้เมื่อช่องสัญญาณใช้งาน N_c ช่องหาได้จาก

$$P_{FWM}(f_m) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_m} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_{ijk}) \quad (1)$$

เมื่อ $P_{FWM}(f_{ijk})$ สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ d_{ijk} คือองค์ประกอบที่แสดงสภาวะความเสื่อม, P_i, P_j, P_k คือกำลังของสัญญาณอินพุตที่ความถี่ f_i, f_j, f_k , λ คือความยาวคลื่นแสง, n คือดัชนีหักเหของคอร์, L คือความยาวเส้นใยแก้ว, α คือสัมประสิทธิ์การสูญเสีย, χ^3 คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3, c คือความเร็วแสง และ η_{ijk} คือประสิทธิภาพ FWM หาได้จาก [9]

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left\{ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right\} \quad (3)$$

เมื่อ $\Delta\beta$ คือค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงหาได้จาก [9]

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_k| |f_j - f_k| \left[D + \frac{\lambda^2}{2c} \frac{dD}{d\lambda} (|f_i - f_0| + |f_j - f_0|) \right] \quad (4)$$

เมื่อ D คือค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน, $dD/d\lambda$ คือความชันของดิสเพอร์ชัน, f_i, f_j, f_k คือค่าความถี่ใดๆในระบบ, f_0 คือความถี่อ้างอิง หรือ ความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0 เมื่อใช้การประมาณค่าแบบเกาส์เซียนค่าความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ในระบบส่งสัญญาณ DWDM สามารถหาได้จาก

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

เมื่อ Q คือค่า quality factor (SNR) หาได้จาก [9], [10]

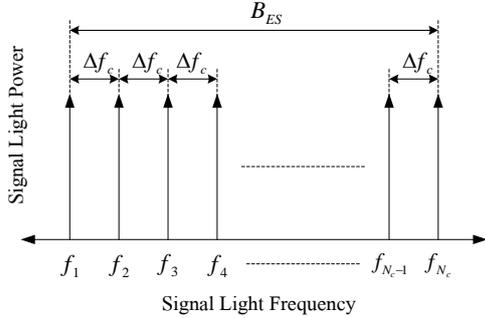
$$Q = \frac{bP_s}{\sqrt{N_{th} + N_{sh} + N_{FWM}} + \sqrt{N_{th}}} \quad (6)$$

เมื่อ P_s คือกำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้, N_{th} คือ thermal noise, N_{sh} คือ shot noise, N_{FWM} คือ FWM noise, $b = \eta e / hf$ เมื่อ η คือประสิทธิภาพควอนตัม, e คือประจุอิเล็กตรอน, h คือค่าคงที่ของพลังค์

2.2 การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณ

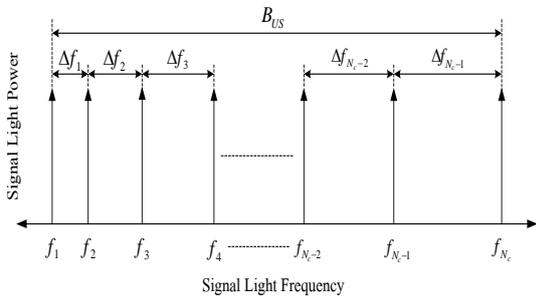
การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced (ES) จะมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (Δf_c) ที่เท่ากันทุกๆ

ช่องสัญญาณ จะแสดงดังรูปที่ 1 เมื่อ B_{ES} คือ ผลรวมของแบนด์วิดท์จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES จะหาได้จาก $B_{ES} = (N_c - 1) \Delta f_c$ เมื่อ N_c คือ จำนวนของช่องสัญญาณ และ f_i คือ ความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณ



รูปที่ 1 การจัดช่องสัญญาณแบบ ES

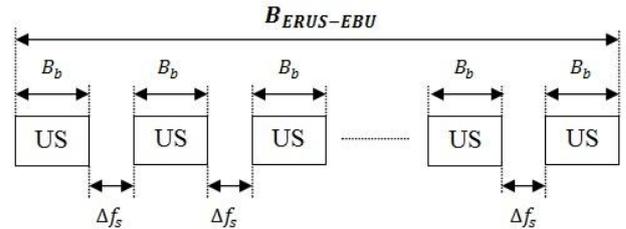
การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) จะมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (Δf_i) ที่ไม่เท่ากันทุกๆ ช่องสัญญาณ เมื่อ B_{US} คือ ผลรวมของแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) หาค่าได้จาก $B_{US} = \sum_{i=1}^{N_c-1} d_i \cdot \Delta f$ เมื่อ $d_i \cdot \Delta f$ เป็นระยะห่างของช่องสัญญาณลำดับที่ i ดังรูปที่ 2



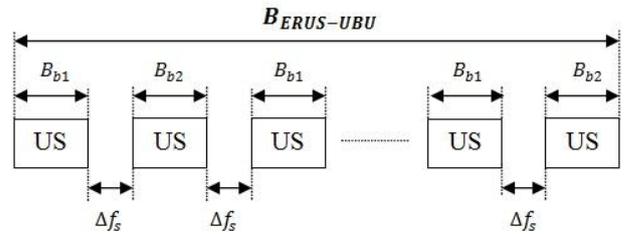
รูปที่ 2 การจัดช่องสัญญาณแบบ US

การจัดช่องสัญญาณแบบ Equally Spaced Repeated Unequally Spaced – Equally Base Unit (ERUS-EBU) จะใช้เทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ US โดยทำให้ทุกๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ (เราเรียกกลุ่มของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำว่า base unit) และเว้นให้มีระยะห่างระหว่าง base unit (Δf_s) ที่เท่ากันแสดงในรูปที่ 3 เมื่อ $B_{ERUS-EBU}$ คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU หาได้จาก $B_{ERUS-EBU} = nB_b + (n-1)\Delta f_s + B_{res}$ เมื่อ n คือจำนวนของ base unit, B_b คือแบนด์วิดท์ของ base unit,

Δf_s คือระยะห่างระหว่าง base unit ที่อยู่ข้างเคียงกัน และ B_{res} คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยแบนด์วิดท์ของ base unit แรกครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 1-6, base unit ที่ 2 ครอบคลุมช่องสัญญาณ 7-12 ไปจนถึง base unit สุดท้าย ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อ f_1 เท่ากับ 192.1THz โดย $f_{i+1} = f_1 + \Delta f_i$ และ $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$ ซึ่ง $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$



รูปที่ 3 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU



รูปที่ 4 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU

การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ Equally spaced Repeated Unequally Spaced - Unequally Base Unit (ERUS-UBU) ใช้เทคนิคของการจัดช่องสัญญาณแบบ Unequally Spaced (US) โดยเลือกระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน base unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ แล้วเว้นระยะห่างระหว่าง base unit ที่เท่ากันและทำการเลือกระยะห่างช่องสัญญาณแบบไม่เท่ากันภายใน base unit ให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเพิ่มอีก base unit แล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ ดังแสดงรูปในที่ 4 (คล้ายกับการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU แต่แตกต่างกันที่การจัดช่องสัญญาณภายใน base unit) โดยเมื่อ ERUS-EBU คือระยะห่างช่องสัญญาณภายใน base unit โดยเลือกให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด ส่วน $B_{ERUS-UBU}$ คือแบนด์วิดท์ของการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU เมื่อ $B_{ERUS-UBU} = B_{ERUS-EBU}$ โดยวิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงแบบ ERUS-UBU มีลำดับขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดช่องสัญญาณให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณภายใน base unit แรกโดยทำให้ทุก ๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันกับจำนวนหนึ่ง แล้วทำให้สัญญาณเกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ โดย (Δf_{i1}) เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz โดย base unit แรกครอบคลุมช่องสัญญาณที่ 1-6 (สาเหตุที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีด จำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสง)

ขั้นตอนที่ 2) กำหนดช่องสัญญาณระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณภายใน base unit ที่สองโดยทำให้ทุก ๆ ช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันกับจำนวนหนึ่ง (Δf_{i2}) เท่ากับ 37.5GHz, 87.5GHz, 100GHz,

112.5GHz และ 162.5GHz โดย base unit ที่สองครอบคลุมช่องสัญญาณที่ 7-12 (สาเหตุที่กำหนดระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 37.5GHz เนื่องจากขีด จำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสง [8])

ขั้นตอนที่ 3) จากขั้นตอนที่ 3 นำมาจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU โดยหาค่า Δf_s ให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดย $\Delta f_s \neq \Delta f_i$ ดังนั้นจะทำการเลือกค่า $\Delta f_s = 62.5$ GHz (เมื่อ Δf_s มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของ $\Delta f_{i1} = 50$ GHz อยู่ 12.5 GHz และน้อยกว่าค่าที่น้อยที่สุดถัดมา $\Delta f_{i1} = 75$ GHz อยู่ 12.5 GHz) จากวิธีการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f_i (THz)	192.1	192.15	192.23	192.33	192.45	192.6	192.66	192.71	192.79	192.89	193.01	193.16	193.23	193.33
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.35	193.45	193.58	193.73	193.79	193.84	193.91	194.01	194.14	194.29	194.35	194.40	194.48	194.58
Δf_i (GHz)	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
f_i (THz)	194.70	194.85	194.91	194.96	195.04	195.14	195.26	195.41	195.48	195.53	195.60	195.70	195.83	195.98
Δf_i (GHz)	125	150	62.5	50	75	100	125	150	62.5	50	75	100	125	150

ตารางที่ 2 การจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU ในช่วงแบนด์วิดท์ของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f_i (THz)	192.1	192.15	192.23	192.33	192.45	192.6	192.66	192.70	192.79	192.89	193.00	193.16	193.23	193.28
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.35	193.45	193.58	193.73	193.79	193.83	193.91	194.01	194.14	194.29	194.35	194.40	194.48	194.58
Δf_i (GHz)	75	100	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	75	100
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
f_i (THz)	194.70	194.85	194.91	194.95	195.04	195.14	195.25	195.41	195.48	195.53	195.60	195.70	195.83	195.98
Δf_i (GHz)	125	150	62.5	37.5	87.5	100	112.5	162.5	62.5	50	75	100	125	150

3. ผลลัพธ์จากการทดลอง

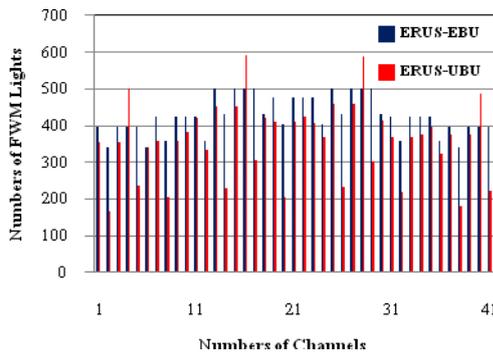
ในการหาผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองโดยกำหนดให้กำลังของแต่ละความยาวคลื่นที่ได้จาก EDFA ในช่วง 1529.55 - 1560.29 nm (192.1 - 196.0 THz) และ ตาม

มาตรฐาน ITU-T G.694.1 โดยส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยแก้วชนิด Non-Zero Dispersion Shift Fiber (NZDSF) มีค่า $D=4.6\text{ps/nm-km}$, $dD/d\lambda=9\text{ps/nm}^2\text{-km}$, $L=80\text{km}$, $\alpha=0.2\text{dB/km}$ และกำหนดให้ Avalanche Photodiode

(APD) มีค่า $\eta = 80 \%$

3.1 ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่ FWM (η_{ijk})

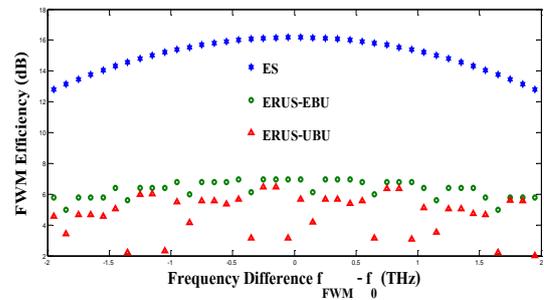
จากรูปที่ 5 แสดงจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU โดยจะเห็นว่าจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีจำนวนของ FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU โดยจำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 8910 และการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีจำนวนของ FWM รวมทั้งหมดเท่ากับ 7586 จะเห็นว่าจำนวนของ FWM จาก ERUS-UBU มีจำนวนที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU เมื่อจำนวนของ FWM ที่น้อยจะส่งผลทำให้ความถี่ที่ไปแทรกสอดช่องสัญญาณข้อมูลน้อยลงตามมา



รูปที่ 5 จำนวนของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU และ ERUS-UBU

จากรูปที่ 6 แสดงประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU โดยการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-EBU มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 5.7132 dB และการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณ

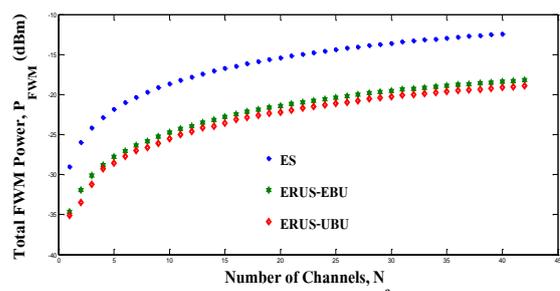
แบบ ERUS-UBU มีค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM เฉลี่ยเท่ากับ 4.8617 dB จะเห็นว่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ FWM จาก ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU โดยจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM นั้นลดลงตามมา



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS-EBU และ ERUS-UBU

3.2 กำลังของ FWM (P_{FWM})

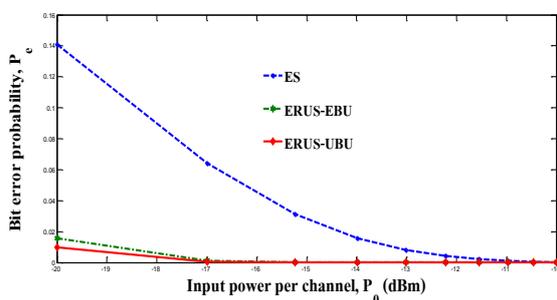
จากรูปที่ 7 แสดงกำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU โดยจะเห็นว่ากำลังของ FWM จากการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU โดยการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS-EBU และ ERUS-UBU มีค่าผลรวมของกำลัง FWM เท่ากับ -15.2987 dB, -21.1040 dBm และ -21.8212 dBm จะเห็นว่ากำลังของ FWM แบบ ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU สาเหตุที่กำลังของ FWM ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบ ERUS-EBU นั้นก็เพราะค่าประสิทธิภาพการรวมกันทางความถี่ของ FWM จะเป็นตัวกำหนดค่ากำลังของ FWM



รูปที่ 7 กำลังของ FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS-EBU และ ERUS-UBU

3.3 ความน่าจะเป็นความผิดพลาด (P_e)

จากรูปที่ 8 แสดงความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU โดยจะเห็นว่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีค่าที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU โดยการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ES, ERUS-EBU, และ ERUS-UBU มีค่ากำลังอินพุตต่อช่องสัญญาณเท่ากับ -5.076 dBm, -11.09 dBm และ -11.79 dBm (กำหนดให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM เท่ากับ 10^{-9}) จะเห็นได้ว่าค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU มีค่าที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงแบบ ERUS-UBU ดังนั้นความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีความน่าจะเป็นที่น้อยกว่าแบบ ES และ ERUS-EBU เพราะค่ากำลังของ FWM จะเป็นตัวกำหนดค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM เมื่อกำลังของ FWM น้อยก็จะส่งผลให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจาก FWM มีค่าที่น้อยลง จึงทำให้การจัดระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU มีค่าที่ลดลงตามไปด้วย จึงสอดคล้องกับหัวข้อที่ 3.2



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นความผิดพลาดจาก ERUS-UBU เปรียบเทียบกับ ERUS-EBU

4. สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการในการจัดระยะห่างของเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเกิดขึ้นของ

FWM ในช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU จากในรูปที่ 5-8 สามารถสรุปได้ว่า การจัดช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU เปรียบเทียบกับวิธีการจัดระยะห่างของช่องสัญญาณที่ได้ทำการปรับปรุงขึ้นมาแบบ ERUS-UBU ซึ่งผลที่ได้จากเปรียบเทียบการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU นั้นสามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเกิดความถี่ FWM ได้ และทำให้ได้คุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าการจัดช่องสัญญาณแบบ ES และ ERUS-EBU ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการจัดช่องสัญญาณแบบ ERUS-UBU สามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการเกิดความถี่ FWM ได้ และปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดและกำลังของ FWM ให้มีค่าลดลงและคุณภาพของสัญญาณที่ดีขึ้นในระบบการส่งสัญญาณแบบ DWDM

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Inoue, "Suppression technique for fiber four-wave mixing using optical multi-/demultiplexers and a delay line," J. Lightw. Technol., Vol.11, No.3, pp.455-461, Mar, 1993.
- [2] I. Neokosmidis, T. Kamalakis, A. Chipouras, and T. Spicopou-los, "New techniques for the suppression of the four-wave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems," J. Lightw. Technol., Vol.23, No.3, pp.1137-1144, Mar, 2005.
- [3] F. Forghieri, R. Tkach, A. Chraplty, and D. Marcuse, "Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.6, No.6, pp.754-756, Jun, 1994.
- [4] T. Numai and O. Kubota, "Analysis of repeated unequally spaced channels for FDM lightwave systems," J. Lightw. Technol., Vol.18, No.5, pp. 656-664, May, 2000.
- [5] V. Rachnarong and S. Nopnakepong. "The Technique to Arrange Channel ERAUS Allocations for DWDM system," ladkrabang Engineer journal, Vol.21, No.4, pp. 19-25, Dec, 2009.