

เทคนิคการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

A Technique of RAUS for Spaced Channel Allocation in DWDM Transmission Systems

วิศวิท ราชณรงค์ และ สุทธิชัย นพนาเคียง

Vissavavit Rachnarong and Sutichai Noppanakepong

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 08-0067-6889 E-mail s2611226@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการในการปรับปรุงผลกระทบของ four-wave mixing (FWM) ให้ดีขึ้น จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ repeated alternate unequally spaced (RAUS) ที่พัฒนาจากวิธีการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ repeated unequally spaced (RUS) โดยเราได้พิจารณาการจัดช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU-T G.469.1 ในช่วงความยาวคลื่น 1529.55 – 1560.61 nm ที่ได้จาก erbium dope fiber amplifier (EDFA) เมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง RAUS มีคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่า RUS ที่ $f_{FWM} = f_i$ ดังนั้นการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS สามารถปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดและกำลังของ FWM ให้มีค่าลดลง ในระบบส่งสัญญาณ DWDM

Abstract

This paper presents the repeated alternate unequally spaced (RAUS) to improve the effect of FWM due to the fibers nonlinear. We proposed a new method to spaced channel allocation of ITU-T G.469.1 standard. By developing a technique of repeated unequally spaced (RUS). This system, we consider the generate wavelength of erbium dope fiber amplifier (EDFA) between 1529.55 – 1560.61nm for DWDM signals. From the simulation results, It found that the new proposed method RAUS is the better performance of the efficiency of four-wave mixing (FWM) lights ($f_{FWM} = f_i$) by comparing the proposed method with RUS algorithm. The new proposed method can be improved the error

probability and decreases the FWM light power in DWDM transmission systems.

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้มีการใช้เทคนิคต่างๆเพื่อลดผลกระทบของการเกิด four-wave mixing (FWM) เช่น การใช้มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แสงร่วมกันของสายหน่วง [1], สัญญาณ bit-phase arranged return-to-zero (BARZ) [2], เทคนิคการผสมผสานกันของ wavelength/time division multiplexing [3], polarization-division multiplexing [4], การผสมผสานกันของการมอดูเลต amplitude/frequency shift keying โดยการใช้ prechirped pulses [5] และ การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ unequally spaced (US) [6] ในบทความนี้เราได้เน้นไปที่ความสัมพันธ์ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ ปัจจุบันนี้การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ repeated unequally spaced (RUS) [7] ได้นำเสนอการแก้ไขปัญหาของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ equally spaced (ES) [8] ES จะเกิดผลกระทบจาก FWM สูงที่ $f_{FWM} = f_i$ เมื่อ f_{FWM} คือความถี่ของแสง FWM และ f_i คือความถี่ของสัญญาณแสงของแต่ละช่องสัญญาณ ในการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS จะทำให้ทุกๆช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากัน (US) จำนวนหนึ่งแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ โดยใช้แบนด์วิดท์ที่แคบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ES ที่จำนวนช่องสัญญาณเท่ากัน โดยการ จัดช่องสัญญาณแบบ RUS จะทำให้ผลกระทบที่เกิดจาก FWM ลดลง จากการสังเกตนี้เราจึงได้มีการปรับปรุงการจัดช่องสัญญาณโดยอาศัยการสลับกันของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ repeated alternate unequally

spaced (RAUS) ทำให้ผลกระทบจาก FWM ลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ RUS ที่ $f_{FWM} = f_i$ เมื่อใช้งานช่วงสัญญาณที่เท่ากัน ในระบบส่งสัญญาณแบบ dense wave-length division multiplexing (DWDM)

2. ทฤษฎีการวิเคราะห์

2.1 ผลกระทบของการเกิด four-wave mixing (FWM)

ระบบส่งสัญญาณแบบ DWDM ช่องสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก FWM ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันและเป็นสาเหตุให้เกิดความเสื่อมลงของสัญญาณเป็นรูปแบบการกระจายตัวของความถี่แสง [9] เมื่อ f_i, f_j และ f_k คือสัญญาณความถี่ของแสงและ f_{FWM} คือความถี่ของแสงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสัญญาณทั้งสามความถี่เนื่องจากผลกระทบของ FWM ซึ่งหาได้จาก $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$ (ในบทความนี้เราพิจารณาผลกระทบของ FWM เป็นสิ่งสำคัญ เราจะไม่พิจารณาผลกระทบของ self-phase modulation, cross-phase modulation และการเสื่อมลงของรูปคลื่น เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่จำกัด [7])

กำลังของสัญญาณด้านเอาต์พุตที่ความถี่ f_{FWM} ที่เกิดจากการรวมกันของความถี่ที่เป็นไปได้เมื่อมีช่องสัญญาณใช้งาน N_c ช่องสัญญาณ หาค่าได้จาก [10 - 11]

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

เมื่อ $P_{FWM}(f_{ijk})$ สามารถคำนวณได้จาก [10 - 11]

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

เมื่อ d_{ijk} คือองค์ประกอบที่แสดงสถานะความเสื่อม, P_i, P_j, P_k คือกำลังของสัญญาณอินพุตของเส้นใยแก้วนำแสงที่ความถี่ f_i, f_j, f_k , λ คือความยาวคลื่นแสง, n คือดัชนีหักเหของคอร์, L คือความยาวเส้นใยแก้ว, χ^3 คือค่าความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่ 3, c คือความเร็วแสง, η_{ijk} คือประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่จาก FWM หาค่าได้จาก [10]

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

เมื่อ $\Delta\beta$ คือค่าความแตกต่างกันของค่าคงที่ในการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสง หาค่าได้จาก [10]

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

เมื่อ D คือค่าโครมาติกดิสเพอร์ชัน, $dD/d\lambda$ คือค่าความชันของดิสเพอร์ชัน, f_i, f_j, f_k คือความถี่ใดๆในระบบ, f_0 คือความถี่อ้างอิง หรือ ความถี่ที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับ 0 เมื่อใช้การประมาณค่าแบบเกาส์เซียนค่าความน่าจะเป็นความผิดพลาดในระบบ DWDM หาค่าได้จาก [10 - 11]

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

เมื่อ Q คือ quality factor (SNR) หาค่าได้จาก [10 - 11]

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

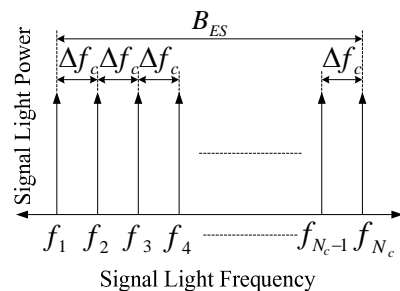
เมื่อ P_s คือกำลังของสัญญาณแสงที่ภาครับรับได้, N_{th} คือ thermal noise power, N_{sh} คือ shot noise power, N_{FWM} คือ FWM noise power, b คือเรสปอนซิวิตี (R)

$$b = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc} \quad (7)$$

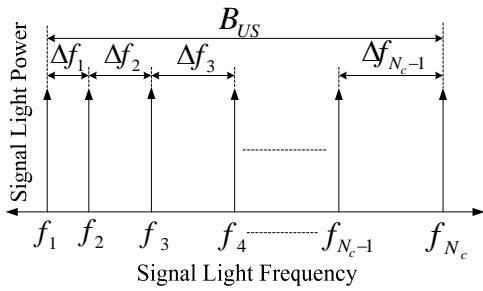
เมื่อ η คือประสิทธิภาพควอนตัม, e คือประจุอิเล็กตรอน, h คือค่าคงที่ของพลังค์, f คือความถี่แสง

2.2 การจัดระยะห่างช่องสัญญาณ

การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ equally spaced (ES) จะมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (Δf_c) ที่เท่ากันทุกช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 1 เมื่อ B_{ES} คือผลรวมของแบนด์วิดท์จากการจัดช่องสัญญาณแบบ ES หาได้จาก $B_{ES} = (N_c - 1) \Delta f_c$ เมื่อ N_c คือจำนวนของช่องสัญญาณและ f_i คือความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณ

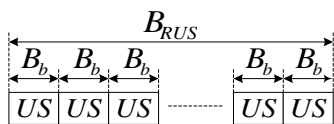


รูปที่ 1 การจัดช่องสัญญาณแบบ ES



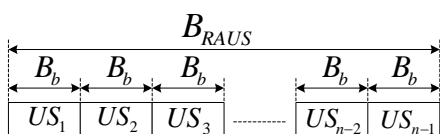
รูปที่ 2 การจัดช่องสัญญาณแบบ US

การจัดช่องสัญญาณแบบ unequally spaced (US) จะมีระยะห่างของช่องสัญญาณ (Δf_i) ที่ไม่เท่ากันทุกๆช่องสัญญาณ เมื่อ B_{US} คือผลรวมของแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ US หาได้จาก $B_{US} = \sum_{i=1}^{N_c-1} d_i \cdot \Delta f$ เมื่อ $d_i \cdot \Delta f$ คือความกว้างของช่องสัญญาณลำดับที่ i ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3 การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS

การจัดช่องสัญญาณแบบ repeated unequally spaced (RUS) ใช้เทคนิคแบบ US โดยทำให้ทุกๆช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันมีระยะห่างที่ไม่เท่ากันจำนวนหนึ่งแล้วทำให้เกิดขึ้นมาใหม่แบบซ้ำ (เรียกกลุ่มที่เกิดขึ้นใหม่แบบซ้ำว่า base unit) ดังรูปที่ 3 เมื่อ B_{RUS} คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS หาได้จาก $B_{RUS} = nB_b + B_{res}$ เมื่อ n คือจำนวนของ base unit, B_b คือแบนด์วิดท์ของ base unit และ B_{res} คือแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา โดยแบนด์วิดท์ของ base unit แรกครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 1-6, base unit ที่ 2 ครอบคลุมที่ช่องสัญญาณ 7-12 ไปจนถึง base unit สุดท้าย และรวมช่องสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อกำหนดให้ 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 4 การจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS

การจัดช่องสัญญาณแบบ repeated alternate unequally spaced RUS (RAUS) ใช้เทคนิคแบบ US โดยนำระยะห่างของความถี่ที่อยู่ภายใน base unit มาสลับที่กันแบบไม่ซ้ำกันในแต่ละ base unit ที่เกิดขึ้นใหม่ ดังรูปที่ 4 B_{RAUS} คือแบนด์วิดท์ของการจัดช่องสัญญาณ RAUS เมื่อ $B_{RAUS} = B_{RUS}$ โดยวิธีการเลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงแบบ RAUS มีลำดับขั้นตอนดังนี้
 ขั้นตอนที่ 1) กำหนดให้ระยะห่างความถี่ของช่องสัญญาณภายใน base unit (Δf_i) เท่ากับ 50GHz, 75GHz, 100GHz, 125GHz และ 150GHz (สาเหตุที่เลือกระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณต่ำสุดที่ 50GHz เนื่องจากขีดจำกัดของอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณแสง [9])
 ขั้นตอนที่ 2) ทำการหาค่าความน่าจะเป็นที่ Δf_i เกิดขึ้นแบบไม่ซ้ำกันภายใน base unit
 ขั้นตอนที่ 3) เลือกไม่ให้ระยะห่างช่องสัญญาณ 50GHz อยู่ใกล้กับระยะห่างช่องสัญญาณ 75GHz และไม่ให้ระยะห่างช่องสัญญาณ 125GHz อยู่ใกล้กับระยะห่างช่องสัญญาณ 150GHz เช่น {50, 75, 150, 125, 100} หรือ {50, 100, 75, 125, 150} ให้คัดออก เป็นต้น
 ขั้นตอนที่ 4) เลือกระยะห่างช่องสัญญาณ 50GHz ให้อยู่ใกล้กับระยะห่างของช่องสัญญาณ 150GHz และตัดระยะห่างของช่องสัญญาณ 50GHz ที่อยู่ใกล้กับระยะห่างของช่องสัญญาณ 100GHz ออก เช่น {50, 150, 75, 100, 125} ให้เลือก หรือ {125, 75, 150, 50, 100} ให้คัดออก เป็นต้น
 ขั้นตอนที่ 5) เลือกระยะห่างของช่องสัญญาณ base unit แรกและ base unit สุดท้าย โดยกำหนดให้ระยะห่างช่องสัญญาณเริ่มต้นที่ 50GHz ใน base unit แรก และลงท้ายที่ 50GHz ใน base unit สุดท้าย เช่น {50, 150, 75, 100, 125} หรือ {125, 75, 100, 150, 50} เป็นต้น
 ขั้นตอนที่ 6) เลือกระยะห่างของช่องสัญญาณให้มีค่าเฉลี่ยของ $|f_i - f_k|$ และ $|f_j - f_k|$ ที่ใกล้เคียงกันที่สุดในแต่ละ base unit จากวิธีการเลือกระยะห่างของช่องสัญญาณแบบ RAUS ได้แสดงในตารางที่ 2

3. ผลลัพธ์จากการทดลอง

เราได้แสดงผลลัพธ์จากความสัมพันธ์ของการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS และ RUS แสดงในรูปที่ 5 – 9 ในการหาผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเรากำหนดให้กำลังของแต่ละความยาวคลื่นที่ได้จาก EDFA ในช่วง 1529.55 – 1560.29nm (192.1–196.0THz) [12-13] ตามมาตรฐาน ITU-T

G.495.1 โดยส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิด non-zero dispersion shift fiber (NZDSF) มีค่า $D = 4.6$ ps/nm-km, $dD/d\lambda = 9$ ps/nm²-km, $L = 80$ km, $\alpha = 0.2$ dB/km และกำหนดให้ avalanche photodiode (APD) มีค่า $\eta = 80\%$

ตารางที่ 1 การจัดช่องสัญญาณแบบ RUS ในช่วงแบนด์วิธของ EDFA ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.1

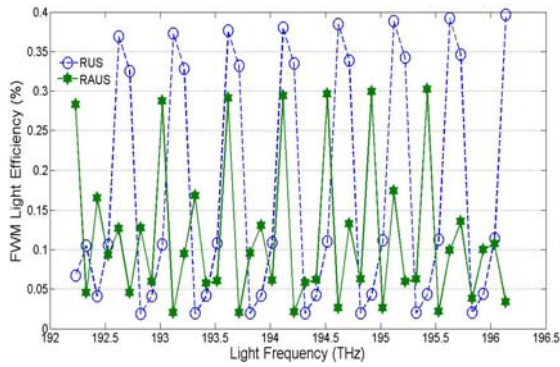
Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f_i (THz)	192.1	192.15	192.225	192.325	192.45	192.6	192.65	192.725	192.825	192.95	193.1	193.15	193.225	193.325
Δf_i (GHz)	50	75	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.45	193.6	193.65	193.725	193.825	193.95	194.1	194.15	194.225	194.325	194.45	194.6	194.65	194.725
Δf_i (GHz)	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
f_i (THz)	194.825	194.95	195.1	195.15	195.225	195.325	195.45	195.6	195.65	195.725	195.825	195.95		
Δf_i (GHz)	100	125	150	50	75	100	125	150	50	75	100	125		

ตารางที่ 2 การจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS ในช่วงแบนด์วิธของ 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	192.3	192.375	192.475	192.6	192.675	192.775	192.925	193.975	193.1	193.2	193.275	193.425
Δf_i (GHz)	50	150	75	100	125	75	100	150	50	125	100	75	150	
Channel	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
f_i (THz)	193.475	193.6	193.675	193.825	193.875	194.0	194.1	194.25	194.3	194.425	194.5	194.6	194.75	194.8
Δf_i (GHz)	50	125	75	150	50	125	100	150	50	125	75	100	150	50
Channel	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		
f_i (THz)	194.925	195.025	195.1	195.2	195.35	195.4	195.525	195.6	195.725	195.8	195.9	195.95		
Δf_i (GHz)	125	100	75	100	150	50	125	75	125	75	100	50		

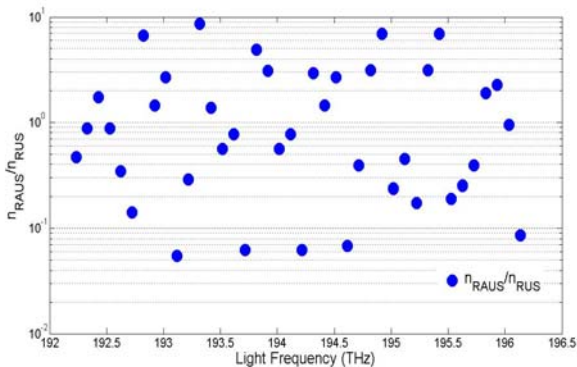
3.1 ประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่ FWM (η_{ijk})

จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่ FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันของ FWM จาก RAUS และ RUS ที่ $f_{FWM} = f_i$

แบบ RAUS เปรียบเทียบกับแบบ RUS ที่ $f_{FWM} = f_i$ ผลลัพธ์ที่ได้ในการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS มีค่าเฉลี่ยของ η_{ijk} ประมาณ 0.1163 % และการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS มีค่าเฉลี่ยของ η_{ijk} ประมาณ 0.1735% ดังนั้น η_{ijk} ของ RAUS น้อยกว่า RUS จากจำนวนช่องสัญญาณ 40 ช่อง



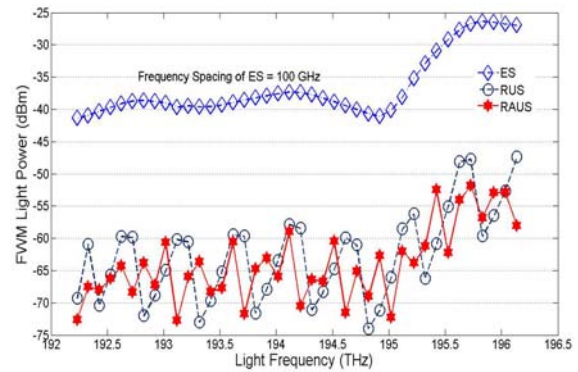
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันของ ความถี่ FWM จาก η_{RAUS} / η_{RUS} ที่ $f_{FWM} = f_i$

จากรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการรวมกันของความถี่ FWM จาก η_{RAUS} / η_{RUS} ที่ $f_{FWM} = f_i$ ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรวมกันของ FWM จาก η_{RAUS} / η_{RUS} มีค่าน้อยกว่า 1 อยู่ 23 ช่องสัญญาณ และมากกว่า 1 อยู่ 17 ช่อง สัญญาณ จากจำนวนช่องสัญญาณ 40 ช่อง ดังนั้นเราสามารถบอกได้ว่าการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS มีประสิทธิภาพการรวมกันของ

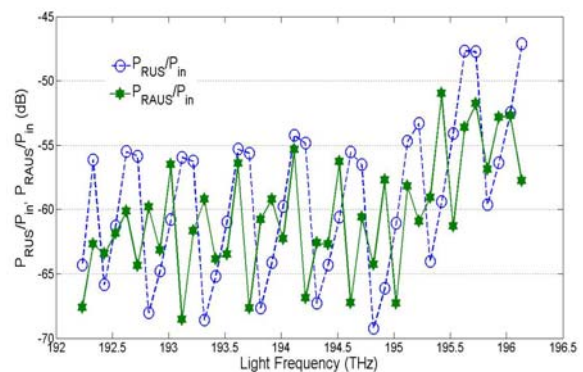
ความถี่ FWM ที่น้อยกว่าการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS เฉลี่ยประมาณ 15 %

3.2 กำลังของ FWM (P_{FWM})

จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลัง FWM จากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ ES, RUS และ RAUS (ES มีค่า $\Delta f_c = 100\text{GHz}$) เปรียบเทียบกันที่ $f_{FWM} = f_i$ ผลลัพธ์ที่ได้ในการจัดช่องสัญญาณแบบ ES มีค่าเฉลี่ย P_{FWM} ประมาณ -36.5481dBm, RUS ประมาณ -62.5831 dBm และ RAUS ประมาณ -63.8658dBm ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกำลัง FWM จากการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS มีค่าที่ต่ำกว่า RUS และ ES จากจำนวนช่องสัญญาณ 40 ช่อง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกำลัง FWM จาก ES, RUS และ RAUS ที่ $f_{FWM} = f_i$



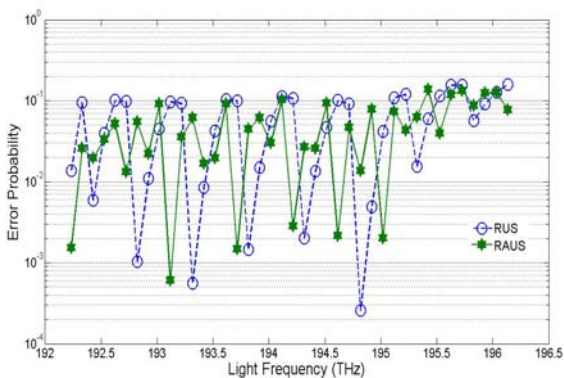
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของกำลัง FWM เมื่อเปรียบเทียบ P_{RAUS} / P_{in} และ P_{RUS} / P_{in} ที่ $f_{FWM} = f_i$

จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของกำลัง FWM เมื่อเปรียบเทียบ P_{RAUS} / P_{in} กับ P_{RUS} / P_{in} ที่ $f_{FWM} = f_i$ ผลลัพธ์

ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง P_{RAUS} / P_{in} มีค่ากำลังเฉลี่ยประมาณ -58.0625dB และ P_{RUS} / P_{in} มีค่ากำลังเฉลี่ยประมาณ -55.4160dB ดังนั้นความสัมพันธ์ของกำลัง FWM จาก P_{RAUS} / P_{in} มีค่าต่ำกว่า P_{RUS} / P_{in} จากจำนวนช่องสัญญาณ 40 ช่อง

3.3 ความน่าจะเป็นความผิดพลาด (P_e)

จากรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นความผิดพลาดจากการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS เปรียบเทียบกับการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS ที่ $f_{FWM} = f_i$ ผลลัพธ์ที่ได้ในการจัดช่องสัญญาณแบบ RAUS มีค่าเฉลี่ยของ P_e ประมาณ 0.0525 และการจัดช่องสัญญาณแบบ RUS มีค่าเฉลี่ยของ P_e ประมาณ 0.0656 ดังนั้นความน่าจะเป็นความผิดพลาดของ RAUS มีค่าน้อยกว่า RUS จากจำนวนช่องสัญญาณ 40 ช่อง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นความผิดพลาดจาก RAUS เปรียบเทียบกับ RUS ที่ $f_{FWM} = f_i$

4. สรุป

ในบทความนี้เราได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS จากรูปที่ 5-9 เราสามารถสรุปได้ว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS เกิดผลกระทบจาก FWM ที่น้อยกว่าการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS เฉลี่ยประมาณ 15% ที่ $f_{FWM} = f_i$ จากจำนวนช่องสัญญาณ 40 ช่อง การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RAUS มีความกว้างของแบนด์วิดท์ที่เท่ากันกับการจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ RUS แต่การจัดระยะห่างช่องสัญญาณแบบ

RAUS และ RUS มีแบนด์วิดท์ที่แคบกว่าการระยะห่างจัดช่องสัญญาณแบบ ES และ US ทำให้สามารถจุช่องสัญญาณได้จำนวนที่มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Inoue, "Suppression technique for fiber four-wave mixing using optical multi-/demultiplexers and a delay line," *Journal Lightwave Technology*, vol. 11, no. 3, Mar. 1993, pp. 455-461.

[2] K. Sekine, N. Kikuchi, S. Sasaki, and H. Ikeda, "FWM crosstalk reduction using bit-phase arranged RZ(BARZ) signals in WDM systems," presented at the *Optoelectronics Communications Conference*, paper 17B2-4, 1996, pp. 114-115.

[3] A. Okada, V. Curri, S. M. Gemelos, and L. G. Kazovsky, "Reduction of four-wave mixing crosstalk using a novel hybrid WDM/TDM technique," in *Proc. ECOC*, 1998, pp. 289-290.

[4] K. Sekine, S. Sasaki, and N. Kikuchi, "10 Gb/s four-channel wavelength and polarization-division multiplexing transmission over 340 km with 0.5 nm channel spacing," *Electronic Letters*, vol. 31, no. 1, Jan. 1995, pp. 49-50.

[5] I. Neokosmidis, T. Kamalakis, A. Chipouras, and T. Spicopoulos, "New techniques for the suppression of the four-wave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems," *Journal Lightwave Technology*, vol. 23, no. 3, Mar. 2005, pp. 1137-1144.

[6] F. Forghieri, R. Tkach, A. Chraplyvy, and D. Marcuse, "Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels," *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 6, no. 6, Jun. 1994, pp. 754-756.

[7] T. Numai and O. Kubota, "Analysis of repeated unequally spaced channels for FDM lightwave systems," *Journal Lightwave Technology*, vol. 18, no. 5, May 2000, pp. 656-664.

- [8] K. Inoue, "Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region," *Journal Lightwave Technology*, vol. 10, no. 11, Nov. 1992, pp. 1553-1561.
- [9] R. Ramaswami. and K. N. Sivarajan. (2002). "Optical Networks: A Practical Perspective," 2nd ed., Academic Press, 2002.
- [10] L. Zhang and J. Tang, "Label-switching architecture for IP traffic over WDM networks," *IEEE Proc.- Commun*, vol. 147, no. 5, Oct. 2000, pp. 269-276.
- [11] T. S. Chin, F. M. Abbou and E. H. Tat, "Impact of four wave mixing (FWM) in routing and wavelength assignment," *American Journal of Applied Sciences* 5 (8): 1059 – 1063, 2008.
- [12] M. Yamada, T. Kanamori, Y. Terunuma, K. Oikawa, M. Shimizu, S. Sudo and K. Sagawa, "Fluoride - based erbium-doped fiber amplifier with inherently flat gain spectrum," *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 8, no. 7, July 1996, pp. 882-884.
- [13] S. Pinter, J. Jiang and X. Fernando, "A dynamic multi-wavelength simulink model for EDFA," *CCGEI 2004*, May. 2004, pp. 2077-2080.