

รายการอ้างอิง

- [1] Bob Chomycz. FIBER OPTIC INSTALLER'S FIELD MANUAL. McGraw Hill, 2000.
- [2] M. J. Yadlowsky. E. M. Deliso. and V. L. Da Silva. Optical Fibers and Amplifiers for WDM Systems. Proc. of IEEE 85(1997): 1765 - 1779.
- [3] A. Yariv. D. Fekete. and D. M. Pepper. Compensation for Channel Dispersion by Nonlinear Optical Phase Conjugation. Opt. Lett. 4(1979): 52-54.
- [4] R. A. Fisher. B. R. Suydam. and D. Yevick. Optical Phase Conjugation for Time Domain Undoing of Dispersive Self-phase-modulation Effects. Opt. Lett. 8(1983): 611-613.
- [5] K. Kikuchi and C. Lorattanasane. Compensation for pulse waveform distortion in ultra-long distance optical communication system by using nonlinear optical phase conjugator. in Proc. Optical Amplifier and their Application (Yokohama, Japan) (4-6 July 1993): SuC1.
- [6] C. Lorattanasane and K. Kikuchi. Design Theory of Long-Distance Optical Transmission Systems Using Midway Optical Phase Conjugation. IEEE/OSA J. Lightwave Technol 15(1997): 948-955.
- [7] A. Chowdhury. G. Raybon. R.-J. Essiambre. J. H. Sinsky. A. Adamiecki. J. Leuthold. C. R. Doerr. and S. Chandrasekhar. Compensation of Intrachannel Nonlinearities in 40-Gb/s Pseudolinear Systems Using Optical-Phase Conjugation. IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 23(2005): 172-177.
- [8] S. L. Jansen. D. van den Borne. P. M. Krummrich. S. Spälter. H. Suche. W. Sohler. G. D. Khoe. and H. de Waardt. Phase conjugation for increased system robustness. presented at the Proc. Conference Optical Fiber Communication (Anaheim, CA) (7-10 March 2006): OTuK3.
- [9] S.L. Jansen. D. van den Borne. B. Spinnler. S. Calabro. H. Suche. P.M. Krummrich. W. Sohler. G.-D. Khoe. and H. de Waardt. Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Phase-Shift-Keyed Transmission. IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 24(2006): 54-64.
- [10] A. H. Gnauck and P. J. Winzer. Optical Phase-Shift-Keyed Transmission. IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 23(2005): 115-130.

- [11] A. H. Gnauck and P. J. Winzer. Phase-Shift-Keyed Transmission. in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC'2004) (Los Angeles, CA) (24-26 February 2004): TuF5.
- [12] X. Tang and Z. Wu. Nonlinear Noise Amplification in Optical Transmission Systems with Optical Phase Conjugation. IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 23(2005) 1866-1873.
- [13] K. Kikuchi and C. Lorattanasane. Compensation for Pulse Waveform Distortion in Ultra-Long Distance Optical Communication Systems by using Midway Optical Phase Conjugator. IEEE Photon. Technol.Lett. 6(1994): 104-105.
- [14] N. Sarapa and P. Kaewplung. Theoretical Study on the Performance of Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Differential Phase-Shift- Keyed Transmission. in Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'2007) (Baltimore, MD) (6-11 May 2007): JTuA130.
- [15] A. Wonfor. Uncooled 40 Gbit/s Transmission Over 40 km Single Mode Fiber Using Multi-Level Modulation of a Highly Linear Laser. in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC' 2004) (Los Angeles, CA) (24-26 February 2004): MF60.
- [16] G. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics. 3rd Ed.. Academic Press, 2001.
- [17] W. Idller. System Performance and Tolerances of 43-Gb/s ASK and DPSK Modulation Formats. in Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC'2003) (Rimini, Italy) (21-25 September 2003): Th2.6.3.
- [18] C. Xu. Comparison of Return-to-Zero Phase Shift Keying and On-Off Keying in Long Haul Dispersion Managed Transmission. in Proceedings Optical Fiber Communication Conference 4 (2003): ThE3.
- [19] T. Miyana. Suppression of Degradation Induced by SPM/XPM+GVD in WDM Transmission Using a Bit-Synchronous Intensity Modulated DPSK signal. in Proceedings OptoElectronics and Communications Conference (2000): 14D3-3.

- [20] C. Wree. RZ-DQPSK Format with High Spectral Efficiency and High Robustness Towards Fiber Nonlinearities. in Proceedings European Conference and Exhibition on Optical Communication (2002): 9.6.6.
- [21] C. F. Gerald and P. O. Wheatly. Applied Numerical Analysis. 7th Edition. Pearson Education, 2004.
- [22] C. Lorattanasane and K. Kikuchi. Parametric Instability of Optical Amplifier Noise in Long-Distance Optical Transmission Systems. IEEE J. Quantum Electronic 33(1997): 1068-1074.
- [23] Y. Namihira. K. Miyagi. K. Kaneshima. M. Tadakuma. C. Vinegoni. G. Pietra. and K. Kawanami. A Comparison of Six Techniques for Nonlinear Coefficient Measurements of various Single Mode Optical Fibers. presented at the 29th Eur. Conf. Optical Commun. (ECOC) (Rimini, Italy) (21–25 September 2003): We.4.P.40.

ภาคผนวก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 1 ฉบับ

- บทความวิชาการในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (30th Electrical Engineering Conference : EECON-30) จัดขึ้นที่ Felix River Kwai Resort ณ จังหวัดกาญจนบุรี ประเทศไทย ในวันที่ 25-26 ตุลาคม 2550 ในชื่อบทความเรื่อง การประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชัน (*Path-Averaged Peak Power Approximation Including Dispersion Effect*)

ดังนั้นจึงขอนำบทความที่ได้รับการตีพิมพ์มาเสนออีกครั้ง

การประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชัน

Path-Averaged Peak Power Approximation Including Dispersion Effect

ชนิดา ไทวรภา และ พุ แก้วปลั่ง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6907 โทรสาร 0-2218-6912 E-mail: nok_04@hotmail.com, Pasu.K@Chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชันเป็นครั้งแรก บทความนี้ยังได้พิสูจน์ความถูกต้องแม่นยำของค่าประมาณที่ได้คิดค้นขึ้นนี้ด้วยการจำลองการสื่อสารสัญญาณแสงแบบ Differential phase-shift keying ที่มีอัตราข้อมูล 40 Gbit/s และ 5 Gbit/s ในระบบเส้นใยแสงทั้งในระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชัน (dispersion management) และวิธีคอนจูเกชันสัญญาณแสง (optical phase conjugation) ซึ่งผลของการจำลองระบบ ให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความคิดพลาดโดยใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยรวมผลของดิสเพอร์ชันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์กับการใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยแบบเดิมที่คิดผลของการลดทอนของสัญญาณเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: การสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสง, การสื่อสารสัญญาณที่ใช้การมอดูเลตทางเฟส, ค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทาง, การชดเชยดิสเพอร์ชัน, การคอนจูเกชันสัญญาณแสง

Abstract

This paper proposes a path-averaged peak power approximation including dispersion effect of optical fiber for the first time in our knowledge. 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 40 Gbit/s and 5 Gbit/s in both transmission systems using the dispersion management and the optical phase conjugation. The simulation results are in better agreement with the frequency response analysis of the phase error using the path-averaged peak power approximation including dispersion effect comparing to the phase error analysis using the conventional path-averaged peak power that considers only the fiber attenuation.

Keywords: Optical fiber transmission, Phase-shift-keyed transmission, Path-averaged power approximation, Dispersion compensation, Optical phase conjugation

1. บทนำ

เป็นที่ตระหนักกันโดยทั่วไปว่าความคิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากดิสเพอร์ชันและปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ในเส้นใยแสง เป็นปัญหาสำคัญที่จำกัด

สมรรถนะของระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงระยะทางไกล วิธีการลดความคิดเพี้ยนของสัญญาณแสงอันเนื่องมาจากดิสเพอร์ชันที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป คือ การจัดการผลกระทบของดิสเพอร์ชัน (dispersion management: DM) โดยใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion compensating unit: DCU) ซึ่งวิธีการนี้สามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชันได้แต่ไม่สามารถแก้ไขความคิดเพี้ยนที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ได้ ในปี ค.ศ. 1979 วิธีสังยุคเฟสทางแสงหรือวิธีคอนจูเกชันสัญญาณแสง (optical phase conjugation: OPC) ที่จุดกึ่งกลางระบบ ได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Yariv A. [1] วิธีการนี้นอกจากจะชดเชยดิสเพอร์ชันได้แล้ว [2] ยังสามารถลดความคิดเพี้ยนสัญญาณที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์ได้อีกด้วย [3] เมื่อไม่นานนี้ได้มีการทดลองที่นำเสนอเข้ามาซึ่งได้ศึกษาความสามารถของวิธี OPC หลายการทดลอง อาทิเช่น การประยุกต์ใช้วิธี OPC เพื่อชดเชยผลของความคิดพลาดทางเฟสอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เคอร์ในระบบที่ใช้สัญญาณแบบ Return-to-zero differential phase shift-keying (RZ-DPSK) ซึ่งมีอัตราเร็วถึง 40 Gbit/s ผลปรากฏว่าวิธี OPC สามารถลดค่า Bit error rate (BER) ให้ต่ำลงได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มระยะทางในการสื่อสารจาก 5,200 km เป็น 6,400 km [4] การทดลองใช้วิธี OPC เปรียบเทียบกับวิธี DM ในระบบ RZ differential quadrature phase shift-keying (RZ-DQPSK) ที่มีอัตราข้อมูล 21.4 Gbit/s และ 42.8 Gbit/s ผลปรากฏว่าวิธี OPC ให้คุณภาพสัญญาณดีกว่าระบบที่ใช้วิธี DM ในทุกๆ ระยะการสื่อสารตั้งแต่ 2,000 ถึง 10,000 km [5] และการทดลองซึ่งสอดคล้องว่าการใช้วิธี OPC แทนวิธี DM ในระบบสื่อสารสัญญาณซึ่งใช้การมอดูเลตเชิงความยาวคลื่นถึง 44 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณใช้สัญญาณแบบ DPSK ซึ่งมีอัตราข้อมูล 10 Gbit/s สามารถเพิ่มระยะในการสื่อสารได้ถึง 44 % [6]

ที่ผ่านมา การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ [7] ของสัญญาณเดินทางในเส้นใยแสงที่คิดผลของปรากฏการณ์เคอร์นั้น จะใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว [7-9] ในระบบ DM ที่มีกราวง DCU ที่ระยะไกลมาก หรือโดยเฉพาะระบบที่ใช้วิธี OPC นั้น เนื่องจากดิสเพอร์ชันจะมีการสะสมตลอดระยะทางก่อนจะมาถึงจุดทำ OPC ซึ่งอาจเป็นระยะทางนับพันกิโลเมตรได้ ดิสเพอร์ชันที่สะสมของอย่างรุนแรงเช่นนี้ จะส่งผลทำให้กำลังสูงสุดของสัญญาณลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องกว่าผลของการลดทอนของเส้นใยแสงมา ดังนั้นการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณในระบบที่ใช้วิธี OPC โดยใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลจากการลดทอนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียวแบบเดิมนั้น อาจจะได้ผลของปรากฏการณ์เคอร์ซึ่งขึ้นกับกำลังสูงสุดของสัญญาณไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง

บทความนี้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่รวมผลของการรบกวนกำลังสูงสุดของสัญญาณ โดยคิสมเพอร์ชันด้วยเป็นครั้งแรก จากการนำค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของคิสมเพอร์ชันนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความคิดพลาดเฟสในระบบสื่อสารสัญญาณแบบ RZ-DPSK ทั้งระบบที่ใช้วิธี DM และระบบที่ใช้วิธี OPC ผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยที่คิดรวมผลของคิสมเพอร์ชันให้ผลซึ่งถูกต้องแม่นยำกว่าการใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณที่คิดเฉพาะผลจากการรบกวนของเส้นแรงแสดงเพียงอย่างเดียว

2. ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่รวมผลของคิสมเพอร์ชัน

กำลังสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงระยะทางไกลทั่วไปซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์ขยายสัญญาณวางเป็นระยะนั้น มีลักษณะการลดลงแบบเอกโปเนนเชียลและเป็นรายคาบ ซึ่งยากต่อการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ ดังนั้นที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จึงใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลของการรบกวนสัญญาณคิสมการ (1) [7] แทน

$$\bar{P}_L = P_0 \left[\frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha L} \right] \tag{1}$$

โดย \bar{P}_L คือ ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลของการรบกวนสัญญาณ P_0 คือ กำลังสัญญาณเข้า α และ L คือ สัมประสิทธิ์การรบกวนของกำลังสัญญาณ และระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณตามลำดับ

ในความเป็นจริง มิใช่เพียงจากการรบกวนกำลังสัญญาณของเส้นใยแสงที่มีผลต่อการลดลงของกำลังสัญญาณสูงสุดสัญญาณ คิสมเพอร์ชันนั้นนอกจากจะทำให้พัลส์ขยายออกตามเวลาแล้วยังส่งผลต่อการลดลงของกำลังสัญญาณด้วย ดังนั้นค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางควรรวมผลจากคิสมเพอร์ชันเข้าไปด้วย สมการ (2) [10] แสดง envelope ของสัญญาณพัลส์เดี่ยวรูปร่าง Gaussian $A(z, T)$ ที่เดินทางไปในเส้นใยแสงซึ่งคิดผลของอัตราการรบกวนและคิสมเพอร์ชัน

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) \cdot \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 - j\beta_2 z}} \exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - j\beta_2 z)}\right) \tag{2}$$

โดย z และ T_0 คือ ระยะทาง และความกว้างของพัลส์สัญญาณตามลำดับ β_2 คือ group-velocity dispersion (GVD) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แปรผันตรงกับคิสมเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นหนึ่ง แต่มีเครื่องหมายกลับกัน จากสมการ (2) กำลังสูงสุดของ $A(z, T)$ ที่เดินทางไปในเส้นใยแสง ($P(z)$) สามารถคำนวณได้ตามสมการ (3)

$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z) \frac{T_0^2}{\sqrt{T_0^4 + \beta_2^2 z^2}} \tag{3}$$

จากสมการ (3) จะพบว่านอกจาก $P(z)$ จะลดลงแบบเอกโปเนนเชียลด้วยผลของ α แล้ว ยังลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นโดยผลของ β_2 อีก ดังนั้น β_2 จะส่งผลต่อกำลังสูงสุดของสัญญาณเช่นเดียวกับกับ α จากสมการ

(3) ค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางจนถึง L ที่คิดรวมผลของคิสมเพอร์ชันสามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$\bar{P}_{LB} = \frac{1}{L} \int_0^L P(z) dz \tag{4}$$

โดย \bar{P}_{LB} คือ ค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่รวมผลของคิสมเพอร์ชันด้วย ในการหาค่าของอินทิกรัล $\int_0^L P(z) dz$ นั้นต้องใช้วิธีอินทิเกรตแบบเชิงเลข ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้วิธี Legendre-Gauss Quadrature [11] นอกจากนี้เพื่อให้ค่า \bar{P}_{LB} ที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริง จึงเลือกใช้อันดับ $n = 24$ ที่ให้ผลไม่ต่างกับการเพิ่มอันดับขึ้นไปอีกเป็น $n = 25$ มากนัก แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ซึ่งจากวิธี Legendre-Gauss Quadrature นั้นอินทิกรัล $\int_0^L P(z) dz$ สามารถคำนวณได้จาก (5)

$$\int_0^L P(z) dz \approx \frac{L}{2} \sum_{m=1}^n w_m P\left(\frac{L}{2} x_m + \frac{L}{2}\right) \tag{5}$$

โดย $w_m = \frac{2(1-x_m^2)}{(n+1)^2 [P_{n+1}(x_m)]^2}$ และ x_m ได้จากการแก้สมการ $P_n(x_m) = 0$ ซึ่ง

$$P_n(x_m) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n]$$

3. ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสในระบบสื่อสารสัญญาณ DPSK

ในระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงระยะไกลที่ใช้สัญญาณแบบ DPSK ความผิดพลาดทางเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์เป็นปัญหาหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบ การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสนั้นสามารถทำได้โดยการใช่วิธี small signal approximation [12] ซึ่งคือการมอดูเลตอินพุททั้งทาง in phase และ quadrature phase ด้วยสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่ต่างๆ กัน จากการใช่วิธี small signal approximation ร่วมกับการวิเคราะห์การผสมของสัญญาณรบกวนในระบบเส้นใยแสงอาจได้ผลของปรากฏการณ์เคอร์ [7] เราสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดเฟสจากสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงซึ่งผสมสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เคอร์ได้จาก

$$\Delta\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{b_m}{\sqrt{P} + a_m} \right) \tag{6}$$

โดย $\Delta\phi_m$ คือ ค่าความผิดพลาดเฟสอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน \bar{P} คือ กำลังสัญญาณเฉลี่ย $a_m = \sqrt{B_{1,1}(\omega_m)}$, $b_m = \sqrt{B_{2,2}(\omega_m)}$ และ B คือ covariance matrix ของสัญญาณรบกวนที่หาควมซึ่งสำหรับระบบ DM สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) และสำหรับระบบ OPC สามารถคำนวณได้จากสมการ (8)

$$B_{DM}(\omega_m) = \frac{S_0}{2} \sum_{l=1}^N [M(\omega_m, L_l)]^{N-l} [M^*(\omega_m, L_l)]^{N-l} \tag{7}$$

$$B_{OPC}(\omega_m) = \left(S_0 \sum_{l=1}^{N/2} [M(\omega_m, L_l)]^{\frac{N}{2}-l} [M^*(\omega_m, L_l)]^{\frac{N}{2}-l} \right) + \left(\frac{S_0}{2} [M(\omega_m, L_N)]^{\frac{N}{2}} [M^*(\omega_m, L_N)]^{\frac{N}{2}} \right) - \frac{S_0}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

บทความนี้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่รวมผลของการรบกวนกำลังสูงของสัญญาณ โดยคิสมอร์ซันคือตัวเป็นครั้งแรก จากการนำค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของคิสมอร์ซันนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของทางความถี่ของความผิดพลาดในระบบสื่อสารสัญญาณแบบ RZ-DPSK ทั้งระบบที่ใช้วิธี DM และระบบที่ใช้วิธี OPC ผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยที่คิดรวมผลของคิสมอร์ซันให้ผลซึ่งถูกต้องแม่นยำกว่าการใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณที่คิดเฉพาะผลจากการรบกวนของเส้นใยแสงเพียงอย่างเดียว

2. ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่รวมผลของคิสมอร์ซัน

กำลังสัญญาณที่เดินทางในระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงระยะทางไกลทั่วไปซึ่งคืออนุพัทธ์ของสัญญาณวางเป็นระยะนั้น มีลักษณะการลดลงแบบเอกโปเนนเชียลและเป็นรายคาบ ซึ่งยากต่อการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของเชิงความถี่ของระบบ ดังนั้นที่นำมาในการวิเคราะห์จึงใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่เกิดเฉพาะผลของการรบกวนสัญญาณดังสมการ (1) [7] แทน

$$\bar{P}_L = P_0 \left[\frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha L} \right] \tag{1}$$

โดย \bar{P}_L คือ ค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางที่เกิดเฉพาะผลของการรบกวนสัญญาณ P_0 คือ กำลังสัญญาณเข้า α และ L คือ สมประสิทธิ์การลดทอนของกำลังสัญญาณ และระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณตามลำดับ

ในความเป็นจริง มีข้อเท็จจริงจากการลดทอนกำลังสัญญาณของเส้นใยแสงที่มีผลต่อการลดลงของกำลังสัญญาณสูงสุด คิสมอร์ซันนั้นนอกจากจะทำให้พัลส์ขยายออกตามเวลาแล้วจึงส่งผลต่อการลดลงของกำลังสัญญาณด้วย ดังนั้นค่าประมาณกำลังสัญญาณสูงสุดเฉลี่ยตามระยะทางรวมผลจากคิสมอร์ซันเข้าไปด้วย สมการ (2) [10] แสดง envelope ของสัญญาณพัลส์เดี่ยวรูปร่าง Gaussian $A(z, T)$ ที่เดินทางไปในเส้นใยแสงซึ่งมีผลของขั้วการลดทอนและคิสมอร์ซัน

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 - j\beta_2 z}} \exp\left(-\frac{T^2}{2(T_0^2 - j\beta_2 z)}\right) \tag{2}$$

โดย z และ T_0 คือ ระยะทาง และความกว้างของพัลส์สัญญาณตามลำดับ β_2 คือ group-velocity dispersion (GVD) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แปรผันตรงกับค่าคิสมอร์ซันที่ความยาวคลื่นหนึ่ง แต่มีเครื่องหมายกลับกัน จากสมการ (2) กำลังสูงสุดของ $A(z, T)$ ที่เดินทางไปในเส้นใยแสง ($P(z)$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$P(z) = P_0 \exp(-\alpha z) \frac{T_0^2}{T_0^4 + \beta_2^2 z^2} \tag{3}$$

จากสมการ (3) จะพบว่านอกจาก $P(z)$ จะลดลงแบบเอกโปเนนเชียลด้วยผลของ α แล้ว ยังลดลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นโดยผลของ β_2 อีก ดังนั้น β_2 จะส่งผลต่อกำลังสูงสุดของสัญญาณเช่นเดียวกับกับ α จากสมการ

(3) ค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางจนถึง L ที่คิดรวมผลของคิสมอร์ซันสามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$\bar{P}_{LD} = \frac{1}{L} \int_0^L P(z) dz \tag{4}$$

โดย \bar{P}_{LD} คือ ค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่รวมผลของคิสมอร์ซันด้วย ในการหาค่าของอินทิกรัล $\int_0^L P(z) dz$ นั้นต้องใช้วิธีอินทิเกรตแบบเชิงเลข ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้วิธี Legendre-Gauss Quadrature [11] นอกจากนี้ เพื่อให้ค่า \bar{P}_{LD} ที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริง จึงเลือกใช้อันดับ $n = 24$ ที่ให้ผลไม่ต่างกับการเพิ่มอันดับขึ้นไปอีกเป็น $n = 25$ มากนัก แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ซึ่งจากวิธี Legendre-Gauss Quadrature นั้นอินทิกรัล $\int_0^L P(z) dz$ สามารถคำนวณได้จาก (5)

$$\int_0^L P(z) dz \approx \frac{L}{2} \sum_{i=1}^n w_i P\left(\frac{L}{2} x_i + \frac{L}{2}\right) \tag{5}$$

โดย $w_i = \frac{2(1-x_i^2)}{(n+1)^2 [P_n(x_i)]^2}$ และ x_i ได้จากการแก้สมการ $P_n(x_i) = 0$ ซึ่ง $P_n(x_i) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2-1)^n]$

3. ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสในระบบสื่อสารสัญญาณ DPSK

ในระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงระยะไกลที่ใช้สัญญาณแบบ DPSK ความผิดพลาดทางเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากปรากฏการณ์เคอร์เป็นปัญหาหลักที่จำกัดสมรรถนะของระบบ การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสนั้นสามารถทำได้โดยการใช้วิธี small signal approximation [12] ซึ่งคือการมองดูผลคี่กันที่ทั้งทาง in phase และ quadrature phase ด้วยสัญญาณขนาดเล็ที่ความถี่ต่างๆ กัน จากการใช้วิธี small signal approximation ร่วมกับวิธีการหาค่ารวมของสัญญาณรบกวนในระบบเส้นใยแสงภายใต้ผลของปรากฏการณ์เคอร์ [7] เราสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดเฟสจากสัญญาณรบกวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงซึ่งสะสมอยู่ปลายทางแบบไม่เป็นเชิงเส้นอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เคอร์ได้จาก

$$\Delta\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{\sqrt{P} + a_n} \right) \tag{6}$$

โดย $\Delta\phi_n$ คือ ค่าความผิดพลาดเฟสอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน \bar{P} คือ ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ย $a_n = \sqrt{B_{11}(\omega_n)}$, $b_n = \sqrt{B_{22}(\omega_n)}$ และ B คือ covariance matrix ของสัญญาณรบกวน ที่กล่าวถึงซึ่งสำหรับระบบ DM สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) และสำหรับระบบ OPC สามารถคำนวณได้จากสมการ (8)

$$B_{DM}(\omega_n) = \frac{S_0}{2} \sum_{i=1}^N [M(\omega_n, l_i)]^{N-4} [M^T(\omega_n, l_i)]^{N-4} \tag{7}$$

$$B_{OPC}(\omega_n) = \left(S_0 \sum_{i=1}^{N/2} [M(\omega_n, l_i)]^{\frac{N}{2}-4} [M^T(\omega_n, l_i)]^{\frac{N}{2}-4} \right) + \left(\frac{S_0}{2} [M(\omega_n, l_i)]^{\frac{N}{2}} [M^T(\omega_n, l_i)]^{\frac{N}{2}} \right) - \frac{S_0}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

PH07

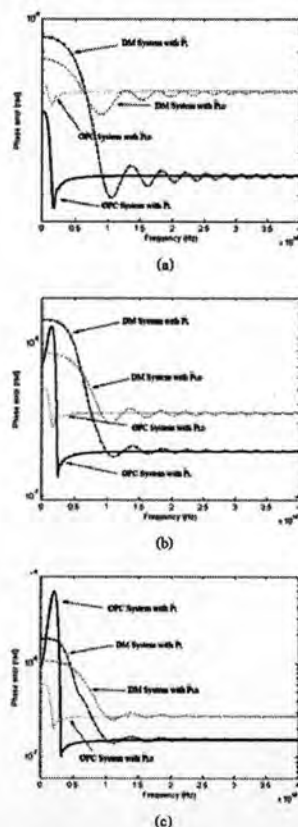
$$\hat{z} \text{ ที่ } M(\omega_m, z) = \begin{bmatrix} \cos(\kappa z) & -\Gamma \sin(\kappa z) \\ \Gamma \sin(\kappa z) & \cos(\kappa z) \end{bmatrix}$$

$$\text{โดยที่ } \Gamma = \sqrt{\frac{\beta_2 \omega_m^2}{(\beta_2 \omega_m^2 + 4\gamma P)}} \text{ และ } \kappa = \frac{\sqrt{\beta_2 \omega_m^2 (\beta_2 \omega_m^2 + 4\gamma P)}}{2}$$

ในสมการ (7) และ (8) S_p , N , γ และ ω_m คือ power spectral density ของสัญญาณรบกวน จำนวนคู่ปรมาณซ์ชายสัญญาณ ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง และความถี่ที่เลื่อนจากความถี่คลื่นพาหตามลำดับ

เพื่อคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดเฟสทั้งในระบบ DM และ OPC เรากำหนดให้อุปกรณ์ขยายสัญญาณเป็นชนิด Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) ซึ่งมีค่า noise figure = 5 dB และ $L_a = 50$ km เส้นใยแสงซึ่งใช้สัญญาณนั้นเป็นชนิด Standard single mode fiber (SMF: ITU-T G.652) ซึ่งมีความยาวคลื่น 1,550 nm นั้นมีค่า $\alpha = 0.2$ dB/km ค่าดีสเพอร์ชันเท่ากับ 16.3 ps/(km-nm) และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น $\gamma_{SMF} = 1.06$ w⁻¹km⁻¹ [13] ส่วน DCU นั้นเป็นอุปกรณ์อุดมคติซึ่งมีค่าดีสเพอร์ชันเท่ากับ -109.1 ps/(km-nm) ที่ความยาวคลื่น 1,550 nm [13] ระยะทางที่ใช้ในการสื่อสารสัญญาณคือ 5,000 km

รูปที่ 1 (a) (b) และ (c) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาด



รูปที่ 1. ผลตอบสนองทางความถี่ของค่าความผิดพลาดทางเฟสซึ่งแสดงโดยความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาหในกรณี (a) $P_0 = 1$ mW (b) $P_0 = 3$ mW และ (c) $P_0 = 5$ mW

เฟสที่ใช้ \bar{P}_L และ \bar{P}_{LD} ในการคำนวณ โดย P_0 มีค่าเป็น 1 mW, 3 mW และ 5 mW ตามลำดับ ในการพิจารณาว่าระบบใดให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่ากันนั้นจะดูที่ผลต่างของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของความผิดพลาดเฟสของแต่ละระบบ ควบคู่กับความกว้างของแถบความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาหซึ่งเกิดจากความผิดพลาดเฟสสูง ระบบที่ผลต่างของความผิดพลาดเฟสน้อยจะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่มีผลต่างของความถี่เฟสมาก ในขณะที่เดียวกัน ระบบที่ความถี่ของแถบความถี่ที่มีความผิดพลาดเฟสสูงกว้างและความถี่ของแถบความถี่นี้ไม่เกินกว่าแถบความถี่ใช้งานของระบบจะให้คุณภาพสัญญาณที่แยกว่าระบบที่มีความถี่ของแถบความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสซึ่งมีความถี่น้อยกว่า

จากรูปที่ 1 ค่าความผิดพลาดเฟสจะมีค่าสูงที่ความถี่ที่ความถี่พาหและจะมีค่าลดลงต่ำกว่าหนึ่งเมื่อความถี่สูงขึ้น ถ้าพิจารณาเฉพาะความถี่ของความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาหจะเห็นว่าระบบที่ใช้วิธี OPC จะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบ DM ทั้ง 3 ค่าของ P_0 เนื่องจากระบบที่ใช้วิธี OPC มีแถบความถี่ของช่วงที่มีความผิดพลาดทางเฟสสูงแคบกว่าระบบที่ใช้วิธี DM ทั้งกรณีที่ใช้ \bar{P}_L หรือ \bar{P}_{LD} แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของผลต่างของค่าความผิดพลาดเฟสสูงและต่ำสุด กรณีที่ใช้ค่าประมาณกำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางที่คิดเฉพาะผลของการลดทอนสัญญาณ ในการคำนวณที่ $P_0 = 5$ mW ปรากฏว่าระบบที่ใช้วิธี DM มีค่าผลต่างที่ต่ำกว่าระบบ OPC อย่างชัดเจนในช่วงแถบความถี่ประมาณ 1 - 5 GHz ดังนั้นในกรณีที่ใช้ \bar{P}_L ในการวิเคราะห์นั้นจะพบว่าที่กำลังสัญญาณขาเข้า 5 mW ไม่สามารถระบุได้ว่าระบบใดให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่ากัน ในทางกลับกัน เมื่อใช้ \bar{P}_{LD} ในการคำนวณนั้น ปรากฏว่าระบบที่ใช้วิธี OPC จะมีค่าผลต่างความถี่เฟสต่ำกว่าในทุกๆ ช่วงความถี่ทั้ง 3 ค่าของ P_0 ดังนั้นในกรณีที่ใช้ค่า \bar{P}_{LD} จะพบว่า ระบบที่ใช้วิธี OPC จะให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธี DM ทั้ง 3 ค่าของ P_0

4. ผลการจำลองระบบทางคณิตศาสตร์

จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟส การใช้ \bar{P}_L และ \bar{P}_{LD} นั้นให้ข้อสรุปที่ต่างกันโดยเฉพาะ ในกรณีที่ P_0 มีค่าค่อนข้างสูง ในการตัดสินใจว่าค่าประมาณกำลังสูงสุดสัญญาณเฉลี่ยแบบใดให้ความถูกต้องแม่นยำกว่านั้น จำเป็นต้องอาศัยการจำลองการสื่อสารสัญญาณในระบบโดยวิธีทางคณิตศาสตร์เป็นการพิสูจน์

ในการจำลองการสื่อสารสัญญาณทางคณิตศาสตร์นั้น สัญญาณที่ใช้มีลักษณะเป็น Pseudo random 1024-bit 66%-RZ DPSK ที่อัตราข้อมูล 40 Gbit/s และ 5 Gbit/s โดยค่าที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพสัญญาณคือค่า Q factor ซึ่งที่ Q = 6.9 เทียบเท่าได้กับ BER ประมาณ 10⁻¹² อุปกรณ์ OPC ที่ใช้สมมติให้เป็นแบบอุดมคติ คือ มีประสิทธิภาพการแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณคอนจูเกต 100% และไม่ทำให้ความถี่ของสัญญาณที่เปลี่ยนเป็นสัญญาณคอนจูเกตแล้วเปลี่ยนไป ส่วนพารามิเตอร์อื่นของระบบนั้นเป็นเช่นเดียวกับค่าที่ใช้ในหัวข้อที่คำนวณ การจำลองระบบทางคณิตศาสตร์นั้นใช้ซอฟต์แวร์ OptiSys 5.0

ค่า Q factor ของสัญญาณที่ได้ในการจำลองระบบถูกแสดงในตารางที่ 1 และรูป Eye pattern ที่ใช้ในการคำนวณ Q factor ในกรณีต่างๆ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2 จากค่า Q factor ที่ได้จะเห็นว่าระบบที่ใช้วิธี OPC ให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธี DM ทั้งที่อัตราข้อมูล 40 Gbit/s และ 5 Gbit/s เมื่อใช้ P_0 ทั้ง 3 ค่า (1 mW, 3 mW, และ 5 mW) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชนิดา ไทวราภา เกิดวันพุธที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2545 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี การศึกษา 2549 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550