การสาธิตการทดลองระบบสื่อสารเชิงแสงโดยใช้การกล้ำสัญญาณด้วยความเข้มและการตรวจจับแบบตรงที่ใช้สองบิตแพมสี่ระดับสำหรับโอ-แลน

Experimental Demonstration of 2 Bits PAM-4 Optical Communication System using Intensity Modulation Direct Detection for O-RAN

อัมพวรรณ ยินดีมาก[2] กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี[1] และ วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์[3]

[1]สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ampawan.yi@rmuti.ac.th
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น kidsanapong.pu@rmuti.ac.th
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมา wannaree.wo@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

โอแลน (Open Radio Access Network:O-RAN) เป็นเทคโนโลยีแบบเปิดเพื่อสร้างระบบเครือข่ายที่มีความยืดหยุ่น สำหรับให้ผู้ให้บริการสามารถใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์จากผู้ผลิตที่แตกต่างกันได้ โดยไม่ต้องพึ่งพาผู้ผลิตเครือข่ายเดียวเท่านั้น ที่พัฒนามาจากระบบ RAN แบบเดิม ในอนาคตอันใกล้นี้การสื่อสารระหว่างสายอากาศและเครื่องแม่ข่าย ที่ทำหน้าที่เป็นชุมสาย จะใช้ระบบการสื่อสารเชิงแสงทั้งสิ้น บทความนี้เสนอการทดลองระบบการสื่อสารเชิงแสงโดยใช้ การกล้ำสัญญาณพัลส์แอมพลิจูด 4 ระดับ (PAM-4) โดยใช้เพียงสองบิตในการสร้าง ด้วยการกล้ำสัญญาณเชิงความเข้มแสงและรับแบบตรง สำหรับโอแลน พร้อมกับนำเสนอการแก้ไขสัญญาณที่เครื่องรับด้วยตัวกรองแบบอิมพัลส์จำกัด จากผลการทดลองพบบว่า อัตราบิตผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 1.1930×10^{-4} ที่ระยะทางเท่ากับ 24 km จากการทดลองยังทำให้สามารถต่อยอดเป็นต้นแบบโอแลน ทำให้ประหยัดการนำของเทคโนโลยีได้อีกหลายแสนล้าน

คำสำคัญ: ระบบการสื่อสารเชิงแสง โอแลน การกล้ำสัญญาณด้วยความเข้มและการตรวจจับแบบตรง

Abstract

O-RAN (Open source radio access network) is an open source technology, which will be soon replaced by conventional devices. Additionally, it will allow devices in the communication systems can communicate with each other without having the same bundle. In the near future, the communication between the antenna and the server that acts as an exchange will use optical communication systems. Therefore, in this paper, an experiment of an optical communication system using PAM-4 signals using only two bits to generate is proposed. Iintensity modulation and direct detection (IM-DD) for O-RAN. To compensate at the receiver end, the finite-impulse response (FIR) filter is used. From the experimental results showed that the bit error rate is 1.1930×10^{-4} at a distance of 24 km. Moreover, it can be further developed as a prototype and uses it. This would save hundreds of billions Bath each year.

Keywords: optical communication system, O-RAN, Intensity Modulation Direct Detection

1. บทนำ

O-RAN (Open Radio Access Network) เป็นอุปกรณ์แบบระบบเปิด (Open source) สำหรับการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ (Wireless mobile communication systems)ซึ่งนิยามเครื่องแม่ข่ายสับเปลี่ยนคู่สายว่า Open source Distributed Unit (ODU) และสถานีฐานเรียกว่า Open Source Radio Unit (ORU) ทำให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นและไม่จำกัดกับบริษัทผู้ผลิต อย่างไรก็ตามต้องทำตามมาตราฐานที่ตกลงไว้ โดยที่ระบบโพรโตคอล (Protocol) ที่ใช้คือ enhanced Common Public Radio Interface (eCPRI) และ ethernet [4] เป็นหลัก และใช้ระบบสื่อสารเชิงแสงเป็นหลักเพื่อรองรับการกล้ำสัญญาณ (Modulation format) ความเร็วสูงแต่ง่ายต่อการประมวลผล เนื่องจากเป็นการสื่อสารไม่ไกลมาก น้อยกว่า 10 km สำหรับการกล้ำสัญญาณ PAM-4 (Four-level Pulse Amplitude Modulation) เป็นการกล้ำสัญญาณที่น่าสนใจ เนื่องจากมีลักษณะของสัญญาณเพียงสี่ระดับ จึงตรวจจับและกู้สัญญาณกลับพร้อมแยกสัญญาณได้ง่าย ซึ่งกำลังนิยมใช้กับการสื่อสารเชิงแสงแสดงได้ดัง [5] PAM-4 ใช้แถบสัญญาณในการส่งข้อมูลเพียงครึ่งของอัตราบิตในการกำเนิดสัญญาณ PAM-4 โดยใช้ FPGA และการกล้ำสัญญาณเชิงขนาดตรวจจับแบบตรง ซึ่งแก้ไขช่องสัญญาณอัตราบิตผิดพลาดใช้การหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มค่าอัตราการปรับตัวของ

available online December 1, 2023.
*Corresponding author: อัมพวรรณ ยินดีมาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น (E-mail: jampawan.yi@rmuti.ac.th)

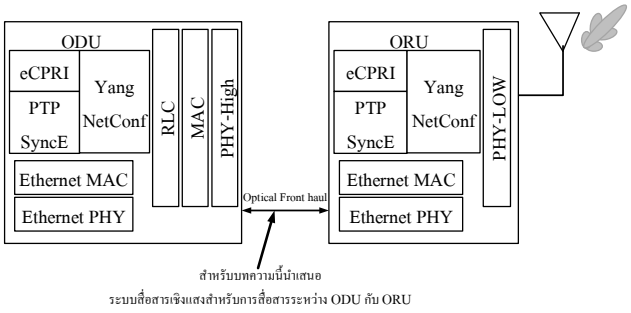
ระบบจะมีผลทำให้อัตราบิตผิดพลาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [6]สำหรับตัวกรองปรับตัวได้ (adaptive filter) เป็นตัวกรองสัญญาณดิจิทัล (digital filter) ที่มีความสามารถในการปรับตัวได้ด้วยตนเอง ซึ่งใช้รูปแบบของ FIR filter ในการปรับปรุงระบบให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยอัลกอริทึม [7] ในกระบวนการ Identification ของตัวกรองปรับตัวได้ ใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง (Least Mean Square Error :LMS)ซึ่งอัลกอริทึมจะมีการปรับตัวอย่างต่อเนื่อง ด้วยการปรับปรุง (update) ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตัว ในการทำให้สัญญาณบิตผิดพลาดมีค่าลดลงมากที่สุด ประสิทธิภาพของการกล้ำสัญญาณ PAM-4 ร่วมกับการแก้ไขช่องสัญญาณทางโดเมนความถี่สำหรับระบบสื่อสารเชิงแสงส่วนหน้าของโอแลน โดยใช้การกล้ำสัญญาณชิงแสงแบบ IM-DD [8] และ [9] นำเสนอ E. Wohlgemuth และคณะทำการสาธิตการเข้ารหัสและระบบส่งกำลังแบบจุดต่อจุด (End-to-end) ด้วยเส้นใยแก้วนำแสงชนิด SMF โดยใช้การกล้ำสัญญาณ IM-DD ต้นทุนต่ำ โดยที่สัญญาณจะถูกฝังภายใต้สัญญาณรบกวน ASE ไว้อย่างสมบูรณ์และไม่สามารถสังเกตุหรือตรวจจับได้โดยเครื่องดักฟัง ผลการทดลองยังพบว่าพบผู้ใช้ที่ได้รับอนุญาตทุกรายและมีบิตผิดพลาดเท่ากับศูนย์

ในบทความนี้นำเสนอระบบสื่อสารเชิงแสงสำหรับการสื่อสารระหว่าง ODU กับ ORU โดยใช้สัญญาณ PAM-4 ที่สร้างจากสัญญาณแบบกลับสู่ศูนย์ (Return-to-zero) เพียงสองบิต และกล้ำสัญญาณด้วยการกล้ำสัญญาณเชิงความเข้มแสง และรับแบบตรง (Intensity modulation direct detection: IM-DD) ทำให้มีราคาถูกตามไปด้วยเนื่องจากไม่ใช้อุปกรณ์การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Digital to Analog Convertor: DAC) โดยการแก้สัญญาณที่ถูกทำให้ผิดเพี้ยนไป (Signal distortion) เนื่องจากผลกระทบต่าง ๆ ในเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับระบบสื่อสารเชิงแสงส่วนหน้า (Optical front end) จะใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้ (Adaptive filter) ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง (Least Mean Square Error :LMS) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อพิจารณาค่าอัตราขยายการปรับตัวของระบบ มีค่าเท่ากับ 0.0625×10^{-3} ทำให้ค่าบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) น้อยที่สุดที่ความยาวเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 24 km

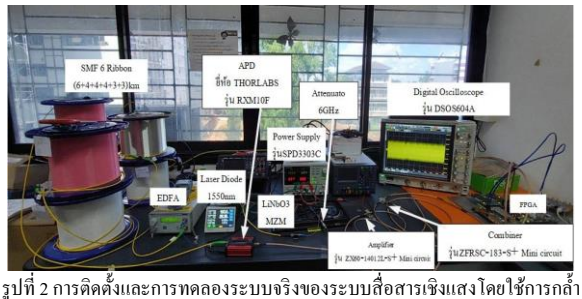
2. สถาปัตยกรรม O-RAN

O-RAN ถูกพัฒนาเมื่อปี 2017 เปิดให้นักพัฒนาระบบทุกคนที่สนใจสามารถพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software) และฮาร์ดแวร์ (Hardware) โดยไม่ยึดติดกับบริษัทใดบริษัทหนึ่ง ทำให้เกิดระบบนิเวศ (Ecosystem) ขึ้น โดยเริ่มจากเครือข่าย 4G สู่ยุค 5G เนื่องจากแบนด์วิธ (Bandwidth) ที่สูงขึ้นเสาอากาศที่มากขึ้น และการใช้เทคโนโลยีหลายอินพุตหลายเอาท์พุต (Multi-input multi-output: MIMO) เกิดความต้องการ การสื่อสารข้อมูลระหว่าง ODU และ ORU มากขึ้นและเป็นการสื่อสารเชิงแสงที่ระดับมากกว่า 1 Gbps ไปจนถึง 40 Gbps ขึ้นอยู่กับจำนวนสายอากาศที่ใช้ ทั้งนี้ที่การสื่อสารยุค 4G และ 5G ทำให้ต้องการแปลงฟูเรียร์เย (Fourier transform) เนื่องจากใช้การกล้ำสัญญาณแบบแบ่งความถี่เชิงตั้งฉาก (Orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) และสามารถหาข้อมูลได้เพิ่มเติมที่ [2] การสร้างสัญญาณ PAM-4 ด้วย 2 บิตสัญญาณ PAM-4 สามารถสร้างได้ง่ายหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมคือใช้อุปกรณ์ DAC ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 10 บิต ขึ้นไป สัญญาณมีคุณภาพที่ดีและสัญญาณรบกวนต่ำ แต่จำเป็นต้องซื้อ DAC ทำให้มีต้นทุนที่สูงขึ้น ในบทความนี้นำเสนอการสร้างสัญญาณ PAM-4 พร้อมเข้ารหัสแบบเกร์ (Gay coding) ด้วย FPGA แบบเวลาจริง (Real time) โดยแสดงหลักการทำงานได้ดังรูปที่ 1

3. การติดตั้งและการทดลอง



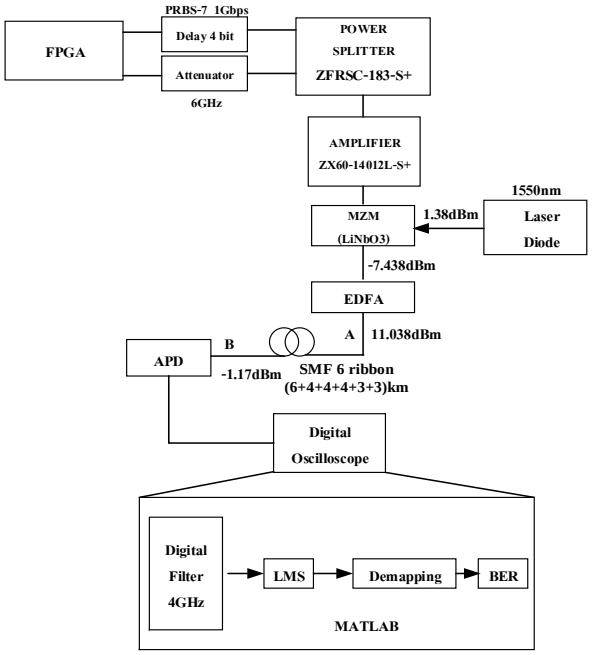
รูปที่ 1 ระบบสื่อสารเชิงแสงสำหรับการสื่อสารระหว่าง ODU กับ ORU ของO-RAN



รูปที่ 2 การติดตั้งและการทดลองระบบจริงของระบบสื่อสารเชิงแสงโดยใช้การกล้ำสัญญาณเชิงความเข้มแสงและรับแบบตรงที่ใช้สองบิตแพมสี่ระดับสำหรับโอ-แลน

ระบบสื่อสารเชิงแสงโดยใช้การกล้ำสัญญาณด้วยความเข้มและการตรวจจับแบบตรงที่ใช้สองบิตแพมสี่ระดับสำหรับโอ-แลน แสดงได้ดังรูปที่ 1-2 จากรูปประกอบด้วยส่วนของภาคส่ง ตัวกลางคือเส้นใยแก้วนำแสง และภาครับสัญญาณ ภาคส่งประกอบด้วย อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field Programmable Gate Array: FPGA) สำหรับสร้างสัญญาณ 2 บิต แต่ละบิตจะสร้างด้วยสัญญาณฐานสองสุ่มเทียม ขนาดความยาวเท่ากับ 7 (Pseudo Random Binary Sequence: PRBS-7) ที่อัตราความเร็วที่ 1Gbps บิตที่1และบิตที่ 2 ห่างกัน 4 บิตเพื่อสร้างสัญญาณ PAM-4 สัญญาณบิตที่ 1 ถูกลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ขนาด 6 dB และนำสัญญาณทั้ง 2 บิตข้อมูลส่งไปรวมกันที่อุปกรณ์รวมสัญญาณ (Combiner) จาก ZFRSC-183-S+ Mini circuit ที่อิมพีแดนซ์ขนาด 50 โอห์ม ทำให้ได้อัตราบิตข้อมูลมีความเร็วสองเท่าที่ 2Gbps สัญญาณที่ได้มีแรงดันเพียง 250 mVp-p ซึ่งไม่เพียงพอต่อการส่งสัญญาณดังนั้นสัญญาณ PAM-4 ที่ได้ถูกขยายด้วยภาคขยาย (Amplifier) รุ่น ZX60-14012L-S+ Mini circuit เพื่อให้ได้แรงดัน 1 Vp-p ซึ่งเพียงพอต่อการป้อนเข้าสู่ อุปกรณ์กล้ำ

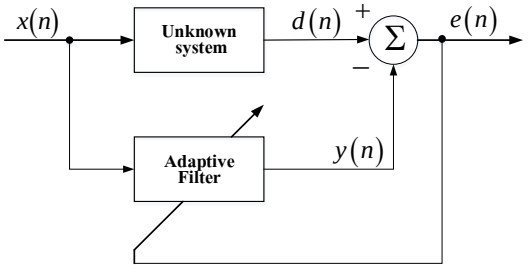
สัญญาณเชิงแสงแบบความเข้มแสง (Mach- Zehnder Modulator: MZM) รุ่น LN81S-FC ถูกจ่ายแรงดันไบอัสขนาด 6.5 V และสัญญาณแสงที่ใช้มีค่าความยาวคลื่น1550 nm ค่าความเข้มแสงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1dBm ค่าความเข้มแสงที่วัดได้ทางเอาต์พุตของ MZM มีค่าเท่ากับ 7.04dBm ก่อนส่งเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงที่ความยาว 24 km ชนิดโหมดเดี่ยว (Single Mode Fiber: SMF) โดยการนำเส้นใยแก้วนำแสงมาต่อกันจำนวน 6 รอบบิน แต่ละรอบบินมีความยาวดังนี้ 6km จำนวน 1 รอบบิน 4km จำนวน 3 รอบบิน และ3km จำนวน 2 รอบบิน สัญญาณเอาต์พุต -7.04 dBm ถูกขยายด้วย EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) เพื่อให้ได้ความเข้มแสงขนาด 11.038dBm ความเข้มแสงที่วัดได้ปลายทางก่อนเข้าอุปกรณ์รับแสงแบบอะวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode: APD) จากเส้นใยแก้วนำแสงระยะทาง 24 km มีค่าเท่ากับ -1.17 dBm ที่ภาครับสัญญาณแสงถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วย APD สัญญาณ PAM-4 ทางไฟฟ้าที่รับได้ถูกบันทึกด้วยออสซิลโลสโคปรุ่น DSOS604A เพื่อประมวลผลการแก้ไขสัญญาณเนื่องจากผลกระทบจากระบบทั้งหมดตั้งแต่ภาคส่ง ถึงภาครับ เช่น การบานออก (Dispersion) ของพัลส์แสง เป็นต้น ด้วยตัวกรองแบบปรับค่าได้ ซึ่งใช้เทคนิค ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3 การทำงานของระบบการสื่อสารเชิงแสงโดยใช้การกล้ำสัญญาณ IM-DD เพียงสองบิตแพมสี่ระดับ สำหรับโอ-แลน

4. วิธีหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง

จากรูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของตัวกรองปรับตัวได้แบบ Identification โดยใช้อัลกอริทึมวิธีการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสองรายละเอียดการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสองแสดงดังสมการที่ (1-3) [6]



รูปที่ 4 โครงสร้างของตัวกรองปรับตัวได้แบบ Identification โดยใช้อัลกอริทึมวิธีการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสอง

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{1}$$

เมื่อ $e(n)$ คือ ค่าผิดพลาดหรือค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่รับได้และสัญญาณอ้างอิงที่ลำดับ n $d(n)$ คือ สัญญาณอ้างอิง $y(n)$ คือ เอาต์พุตเมื่อทำการแก้ไขช่องสัญญาณ (Communication channel) ด้วยการปรับตัวของตัวกรองแบบปรับค่าได้ และจากสมการที่ (2) แสดงการหาค่าถ่วงน้ำหนักของตัวกรอง

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n) x(n) \tag{2}$$

กำหนดให้ $w(n)$ คือค่าถ่วงน้ำหนัก (tap weight) ของตัวกรอง $x(n)$ คือ สัญญาณอินพุต (สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ) และ μ คือ ค่าอัตราขยายการปรับตัวของระบบ (step size) ในการทดลองนี้กำหนดให้ $w(n)$ มีขนาดเท่ากับ L มีค่าตั้งแต่ 0.5k 1k 2k 3k 4k เมื่อ $k = 1024$ และกำหนดให้ μ ประกอบด้วย 0.2 0.1 0.05 0.025 0.0125 0.0625 0.003125 0.000156 จากนั้นนำค่าถ่วงน้ำหนัก $w(n)$ มาแก้ไขสัญญาณที่รับได้ดังสมการที่ (3)

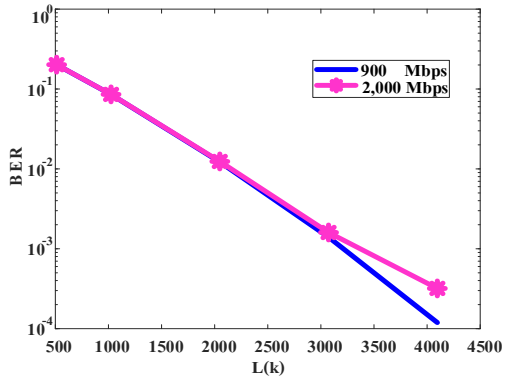
$$\tilde{y}(n) = y^T(n) * w(n) \tag{3}$$

โดยที่ $\tilde{y}(n)$ คือสัญญาณที่เครื่องรับเมื่อถูกแก้ไขช่องสัญญาณเนื่องจากผลกระทบจากระบบทั้งหมดตั้งแต่ภาคส่ง ถึงภาครับ เช่น การบานออก (Dispersion) ของพัลส์แสง เป็นต้น ด้วยตัวกรองแบบปรับค่าได้ ซึ่งใช้เทคนิค ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

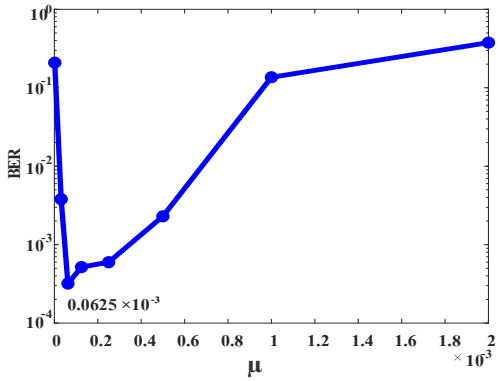
5. ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดลองสำหรับระบบสื่อสารเชิงแสงโดยใช้การกล้ำสัญญาณ IM-DD เพียงสองบิตแพมสี่ระดับสำหรับโอ-แลน โดยพิจารณาจำนวนค่าถ่วงน้ำหนักมีขนาดเท่ากับ L และค่าอัตราขยายการปรับตัวของระบบ μ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate: BER) จากการประมวลผลสัญญาณที่เครื่องรับตามรูปที่ 2 โดยพิจารณาอัตราบิตที่ความเร็ว 900 Mbps และ 2,000 Mbps หรือ 2 Gbps กำหนดให้ L มีค่าตั้งแต่ 0.5k 1k 2k 3k 4k เมื่อ $k = 1024$ และใช้จำนวนการวนรอบในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ที่ 5,000 รอบ จากผลการทดลองตามรูปที่ 4 พบว่า เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็น 4K หรือ

$L = 4096$ จะมีผลให้อัตราบิตผิดพลาดลดลงต่ำที่สุด ดังนั้นพิจารณาได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากขึ้น สามารถลดค่าการบานออกของพัลส์ได้ดีขึ้นดังรูปที่ 5 จากนั้นเพื่อยืนยันการพิจารณาค่าอัตราขยายการปรับตัวของระบบ μ ที่เหมาะสมกับค่าถ่วงน้ำหนักดังรูปที่ 6 กำหนดให้มีค่า μ เท่ากับ 0.2 0.1 0.05 0.025 0.0125 0.0625 0.003125 0.000156 ตามลำดับ พบว่า ที่ μ มีค่าเท่ากับ 0.0625×10^{-3} เป็นค่าอัตราขยายการปรับตัวที่ดีที่สุด มีผลให้ค่าอัตราบิตผิดพลาดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (tap weight) ของจำนวน L(k) กับอัตราบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6 ค่าอัตราขยายการปรับตัวของระบบ μ ที่เหมาะสมกับค่าถ่วงน้ำหนัก

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารเชิงแสงโดยใช้การกล้ำสัญญาณด้วยความเข้มและการตรวจจับแบบตรงที่ใช้สองบิตแพมสี่ระดับสำหรับโอ-แลน ด้วยการทดลองจริงและประมวลด้วย MATLAB ส่วนการแก้ไขสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไปเนื่องจากผลกระทบของช่องสัญญาณการสื่อสาร จะใช้ตัวกรองแบบปรับค่าได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดยกกำลังสองสำหรับการส่งสัญญาณที่ความเร็ว 900 Mbps และ 2,000 Mbps ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราขยายการปรับตัวที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าอัตราบิตผิดพลาดน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.0625×10^{-3} โดยใช้การวนรอบเพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนัก 5,000 รอบ ได้ค่าถ่วงน้ำหนักที่ต้องการที่ 4096

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Al-Falahy and O. Y. Alani, "Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities," in *IT Professional*, vol. 19, no. 1, pp. 12-20, Jan.-Feb. 2017, doi: 10.1109/MITP.2017.9.

[2] S. Mondal and M. Ruffini, "Optical Front/ Mid/ haul with Open Access-Edge Server Deployment Ftamework for Sliced O-RAN," in IEEE Transactions on Network and Service Management,Early Access Articles.

[3] P. Li,W. Pan, X. Zou and L. Yan, "Low- Complexity Adaptive Frequency- Domain Nonlinear Equalization for Analog RoF Mobile Fronthaul Using FFT/ IFFT- Assisted Chanel Aggregation," in Journal of Lightwave Technology,vol. 40,no. 4,pp. 1072- 1082,15 Fed.15,2022.

[4] M. Alavirad, U. Sajid Hashmi, M. Mansour, A. Esswie, R. Atawia, G. Poitau, M. Repeta, " O- RAN architecture, interfaces, and standardization: Study and application to user intelligent admission control," Frontiers in Communications and Networks, March 2023, doi:10.3389/frcmn.2023.1127039

[5] http://www.xilinx.com/publications/events/designcon/2016 /sidespam4signalingfor56gserial-zhang-designcon.pdf

[6] อัมพวรรณ ยินดีมาก และกฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี,"การทดลองระบบการสื่อสารเชิงแสง โดยใช้การกล้ำสัญญษณ PAM-4 และแก้ไขช่องสัญญาณด้วยวงจรกรองปรับตัวได้แบบค่ากำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดสำหรับระบบลังข้อมูล,"การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 44 (EECON44),17-19 พฤศจิกายน 2564 หน้า 287-290

[7] S. R. Prasad and S. A. Patil, "Implementation of LMS algorithm for system identification," 2016 International Conference on Signal and Information Processing (IConSIP), Nanded, India, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICONSIP.2016.7857460.

[8] กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี บุษกร บุญศรี อัมพวรรณ ยินดีมาก และวรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์,"การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกล้ำสัญญาณพัลส์แอมพลิจูด 4 ระดับร่วมกับการแก้ไขช่องสัญญาณทางโดเมนความถี่สำหรับระบบสื่อสารเชิงแสงส่วนหน้าของโอแลน,"การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 45 (EECON45),16-18 พฤศจิกายน 2565 หน้า 348-351

[9] E. Wohlgemuth, Y. Yoffe, T. Yeminy, Z. Zalevsky and D. Sadot, "Low Cost PAM-4 IM/DD Photonic-Layer Secured Communication for DCI Based on Phase Mask," 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Rome, Italy, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535444.